Desenvolvimento de Conceito, Implementação e Teste de Plataforma Eléctrica em Kart Ajustável

André Filipe Alves de Oliveira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Júri

Presidente: Professor Doutor Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista

Orientador: Professor Doutor Pedro Miguel dos Santos Vilaça da Silva

Vogal: Professora Doutora Maria Luísa Coutinho Gomes de Almeida

Vogal: Professor Doutor Luís Alberto Gonçalves de Sousa

Outubro de 2012

Agradecimentos

No decorrer das mais variadas fases deste projecto, foram inúmeras as pessoas que de uma forma ou de outra estiveram do meu lado para que fosse possível atingir um objectivo, o de concluir tão ambicionado capítulo da minha vida.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Pedro Vilaça por todo o apoio prestado durante o desenvolvimento do projecto, e pela experiência muito enriquecedora proporcionada dentro do grupo de trabalho por si liderado, e sobre a qual tenho o maior apreço.

Quero também agradecer o apoio do Eng. João Santos da empresa SportKart. Foi fundamental para estabelecer uma base sólida de desenvolvimento prático do projecto, sendo que a sua colaboração foi igualmente relevante na partilha de conhecimento sobre Karting.

Ao Sr. Álcides, reconhecido funcionário do Kartódromo de Fátima, demonstro o meu sincero agradecimento, pelo apoio, sinceridade e humildade que demonstrou ao colaborar na fase final deste projecto.

A todos os colegas de trabalho com os quais me cruzei, José Pedro Sousa, Duarte Rodrigues, Bruno Sousa, André Carvalho, João Gandra, Miguel José, Diogo Silva, Carlos Castanheira, João Prior, Filipe Nascimento, e a todos os que me acompanharam neste projecto, o meu sincero agradecimento.

Agradeço também aos meus tios Fernando e Irene e primos Sérgio e Samuel, pela ajuda nunca negada em alturas cruciais.

Por fim, o meu mais nobre agradecimento é dirigido aos meus Pais, Manuel e Isabel e à minha irmã Dina, por todo o apoio que sempre demonstraram, o qual foi fundamental para estar hoje a escrever esta frase.

Resumo

O karting surgiu há cerca de 60 anos nos Estados Unidos e consiste numa actividade desportiva praticada com pequenos veículos, que está disponível a todos os cidadãos sem limite de idade, experiência e habilidade.

Os diferentes chassis utilizados conseguem cumprir com as exigências do mundo da competição, ou por outro lado, assegurar prazerosos períodos de lazer.

A faixa etária dos utilizadores é muito alargada, verificando-se a necessidade de adaptar o veículo ao tamanho do utilizador, facto que, muitas das vezes, só é possível trocando de veículo.

Neste sentido, pretende-se com este trabalho, desenvolver um conceito de chassis adaptável ao tamanho do utilizador, fazendo uso de novos materiais estruturais e de novas tecnologias de fabrico.

Na impossibilidade de concretizar materialmente e na íntegra o novo conceito de chassis, opta-se por marcar o início da conversão estrutural a partir de um chassis comum.

Visando a adaptação do veículo ao crescimento progressivo de crianças, são concebidos, construídos e aplicados sistemas de ajuste dinâmicos, com variação da sua posição longitudinal, como são o caso do pedal do travão e acelerador.

No campo da motorização, selecciona-se uma plataforma eléctrica, implementa-se e analisa-se a sua adequação às necessidades em causa.

Para comportar todos os componentes associados à plataforma eléctrica, são também concebidos, construídos e aplicados os suportes da bateria, motor e controlador.

Para uma melhor compreensão dos fenómenos que ocorrem durante a descrição das formas de uma pista comum, desenvolve-se uma análise do comportamento dinâmico do *kart,* em diversas situações possíveis.

Este produto visa aumentar a rentabilidade do investimento neste tipo de oferta, aumentando o intervalo de tempo útil do produto para um período aproximado de sete anos. Durante esse período os utilizadores poderão usufruir dos veículos de uma forma mais económica, ecológica e simplificada, no âmbito da manutenção, quando comparados com os modelos actuais mais comuns.

O objectivo do produto final está centrado nas componentes pedagógicas, comportamentais e de lazer da permanência em pista, não sendo por isso consideradas nesta fase de desenvolvimento as exigências técnicas da vertente de competição. Assim são explorados diversos campos inovadores, para que o resultado final se apresente com destaque no mercado, de entre as opções equivalentes.

PALAVRAS-CHAVE

Chassis de Alumínio

Bateria de LiFePO4

Chassis Ajustável

Kart para Crianças

Kart Eléctrico

Motor de Corrente Contínua

Abstract

Go-kart racing, or karting, is one variant of motorsport practiced with small four-wheeled vehicles, created in the United States, 60 years ago. It is available to all citizens without age limit or driving skills.

Different chassis are used for competition purposes, or in the other hand, for promoting some good leisure moments behind the steering wheel on the go-kart rental companies.

The user age range is very wide, and as a result, the need of fitting the kart driving position to children size often becomes a hard task, sometimes only doable if the kart is exchanged to one proper chassis type. Based on this need, this project aims to develop a new chassis concept, using new structural materials.

Bringing to reality the whole new designed structural concept proved to be a very tough and extensive task, for many reasons. As a result, a second hand common chassis was acquired to set this project the beginning of a progressive structural conversion.

Aiming to adapt the vehicle to the progressive growth of children, dynamic longitudinal adjustment systems are designed, built and assembled, for the brake and accelerator pedals.

An electric platform is selected and implemented, analyzing its fitment to the concerned needs.

In order to implement all the electrical components needed, specific holders are designed, built and assembled, in this case, for the battery pack, DC motor and controller.

A dynamic behavior analysis is done to better understand the chassis performance on track, in several possible situations.

Within the market, this product pretends to increase the return on the investment in this type of offer, once its lifetime period is extended up to 8 years per user approximately. Along this time range, people enjoy the use of a cheaper, ecological and with simplified maintenance go-kart, when compared with common commercially available models.

The aim of the final product is to promote the improvement of children driving skills and behaviors inside the track, as a result, competition requirements are not considered, at this stage. Various innovative fields are therefore explored, as the final result aims to be a remarkable one between the market equivalent options.

KEY-WORDS

Aluminum Chassis
LiFePO4 Battery
Adjustable Chassis
Go-Kart for Children
Electric Go-Kart
DC Motor application

Índice

Lista de figuras

Lista de tabelas

Lista de Abreviações

FSW	-	Friction stir welding
AC	-	Corrente Alternada
DC	-	Corrente Contínua
$Cr - Mo$	-	Crómio - Molibdénio
MIG	-	Tipo de soldadura aplicável a metais não ferrosos, com gás de protecção inerte
MRV	-	Motores de Relutância Variável
kWh	-	Energia [Kilowatt-hora]
SOC	-	Estado de Carga – *State of Charge* [%]
DOD	-	Profundidade de Descarga – *Depth of Discharge* [%]
C	-	Taxa C de carregamento ou descarregamento de uma bateria [Ah]
EV	-	Veículo Eléctrico – *Electric Vehicle*
HEV	-	Veículo Híbrido – *Hybrid Electric Vehicle*
ECU	-	Unidades Electrónicas de Controlo – *Electronic Control Units*
BMS	-	Sistema de Gestão de Baterias – *Battery Management System*
$ICTA$	-	Relatório de avaliação global de segurança - *International Center for Technology Assessment*

1. Introdução

O *karting* é uma actividade desportiva praticada com pequenos veículos, que coloca noutra dimensão a arte de conduzir. Sem requerer licença de condução, está disponível a todos os cidadãos sem limite de idade, experiência e habilidade, que queiram sentir as emoções do asfalto de uma forma intensa e rica em adrenalina. É por isso recorrente que a primeira experiência de carácter lúdico, aquando realizada em tenra idade, se transforme em algo mais sério e exigente como é o caso da competição.

A modalidade, com mais de 50 anos de desenvolvimento, cresceu com constantes melhorias à volta do conceito original, o que coloca os *karts* de hoje num nível de eficácia muito sólido.

Contudo, as circunstâncias ambientais e económicas promovem no mercado a busca de novas formas de energias e de novos materiais, sempre em direcção a um desenvolvimento ecológico e sustentável, o que impulsiona o desenvolvimento deste projecto.

1.1. Objectivos

Este projecto pretende desenvolver um novo conceito estrutural de chassis utilizados em *kart's,* ajustáveis ao tamanho do utilizador, fazendo uso de novos materiais, liga de alumínio *AA5083*, e de novas tecnologias de fabrico.

Visando a adaptação do veículo ao crescimento progressivo de crianças, pretende-se conceber, construir e instalar sistemas de ajuste dinâmicos, com variação da sua posição longitudinal, como são o caso do pedal do travão e acelerador.

No campo da motorização, seguindo as tendências de mercado, será considerada a implementação de uma plataforma eléctrica funcional. A sua adequação às necessidades do projecto em causa será também analisada.

Visando a aplicação dessa plataforma, é proposta a construção de todos os suportes necessários à sua correcta fixação e instalação.

O uso de novas tecnologias de fabrico é também fomentado, por forma a analisar a sua aplicabilidade.

Aborda-se o comportamento dinâmico do *kart*, prevendo-se uma análise compreensiva dos fenómenos que poderão ocorrer em pista, em várias situações possíveis.

O objectivo do produto final está centrado nas componentes pedagógicas, comportamentais e de lazer da permanência em pista, não sendo por isso consideradas, nesta fase de desenvolvimento, as exigências técnicas da vertente de competição.

Este produto visa aumentar a rentabilidade do investimento neste tipo de oferta, aumentando o intervalo de tempo útil do produto para um período aproximado de sete anos. Durante esse período os utilizadores poderão usufruir dos veículos de uma forma mais económica, ecológica e simplificada, no âmbito da manutenção, quando comparados com os modelos actuais mais comuns.

1.2. Enquadramento Histórico

Os *Karts,* como hoje são conhecidos, são originários dos Estados Unidos da América. Por volta dos anos 50, pilotos americanos construíam pequenos carros motorizados, com tubos metálicos, equipados com pequenas rodas de aviões. Inicialmente estes pequenos veículos serviam para dar apoio aos mecânicos nos campos de aviação, só mais tarde o engenheiro Art Ingels construíra um veículo com a concepção base do *Kart* actual, visível na Figura 1. A primeira marca a surgir com patente mundial foi lançada com a designação de *Caretta* e resultou do trabalho de Ingels e de Lou Borelli, engenheiro responsável pela manutenção das estações de serviço da *Standard Oil*.

Figura 1 – Eng. Art Ingels e primeiro kart

A primeira corrida de *karts* realizou-se em 1957, em pistas provisórias e com equipamentos construídos pelos próprios concorrentes. Em Dezembro desse ano foi fundado o *Go-Kart Club of America*, o primeiro K*arting Club* do mundo. A popularidade do novo desporto motorizado não parava de aumentar, e em 1960 foram registados 300 mil *karts*, construídos por várias dezenas de empresas.

Na Europa o movimento fez-se sentir no final dos anos 50 e, em 1962, o *Karting* era inscrito na Federação Internacional do Automóvel. Dois anos mais tarde formava-se a Comissão Internacional de Karting, a autoridade principal da modalidade primeiramente na Europa, e depois no mundo.

A modalidade chegou a Portugal no princípio dos anos 60 e inicialmente era praticado nos parques de estacionamento ou em pracetas. Os primeiros kartódromos foram construídos a partir de 1963, sendo que o mais antigo ainda em funcionamento, o kartódromo *Cabo do Mundo* em Matosinhos, foi fundado em 1979. O ano de 1991 foi onde se verificou uma maior projecção da actividade, ficando mais acessível a todos os cidadãos. Hoje em dia, existem em Portugal *karts* muito avançados, representações de todas as marcas da modalidade, e mais de 30 kartódromos distribuídos por todo o país.

O *Karting* evoluiu tão consistentemente, que se tornou na melhor das escolas de formação para jovens pilotos, havendo já lançado nobres nomes da Fórmula 1 como Nelson Piquet, Ayrton Senna, Nigel Mansell e Alain Prost.

Oficialmente, com base em regulamentos desportivos, o *Karting* é uma actividade que pode ser praticada a partir dos 5 anos de idade. Desta forma existem *karts* no mercado com diferentes dimensões de chassis, associados à faixa etária ou morfologia do piloto.

Os modelos mais comuns, apesar de veículos que não incluem componentes de controlo electrónico sofisticados, permitem diversos acertos e afinações mecânicas, assemelhando-se muito a um fórmula em aceleração e travagem, exigindo uma boa preparação física por parte do condutor. É essencial o piloto conhecer toda a mecânica e os seus pontos de afinação para atingir o seu melhor desempenho. [1], [2], [3], [4]

1.3. Caracterização do Produto e Enquadramento de Mercado

O produto em desenvolvimento neste projecto é um veículo eléctrico para prática de *Karting* de lazer, construído sobre uma base de alumínio, abandonando a estrutura tubular típica de uma liga de aço crómio-molibdénio. Com essa alteração poderão vir a ser explorados novos aspectos, quer relacionados com a redução de peso, quer com o ciclo de vida do chassis, uma vez que a reciclagem do alumínio é ilimitada no número de ciclos, sem degradação de características do material.

A motorização utilizada neste produto dispõe de um enorme potencial, uma vez que permite diversas configurações de controlo, que irão proporcionar um ajuste mais detalhado e adaptado às características e objectivos do condutor.

O *kart* projectado insere-se, como já foi referido, numa actividade acessível a pessoas de todas as idades, não exigindo licença de condução. Verificada essa liberdade, existem duas formas de usufruir deste produto, ou de uma forma pessoal com a aquisição de um kart próprio, ou recorrendo ao mercado de aluguer disponível na maioria dos kartódromos.

De um lado, existe a maior viabilidade do investimento realizado na aquisição de um kart particular. A capacidade de adaptação de determinados componentes do kart ao tamanho da criança, faz com que a sua utilização se estenda a um largo período temporal, excluindo portanto a necessidade de aquisição de outros veículos durante esse período.

Por outro lado, o mercado de aluguer pode aumentar o tempo de rentabilização da frota, tirando também partido de utilizações e manutenções economicamente mais atractivas.

Assim, este produto chega ao mercado aliando essa mais-valia financeira, a uma tecnologia limpa, pouco agressiva auditivamente, de utilização económica, e de reduzida manutenção.

A utilização final do veículo centrar-se-á numa componente pedagógica, de aprendizagem de condução e de comportamento em pista, tendo por isso a vertente competitiva pouca influência na abordagem à resolução deste problema.

1.4. Estrutura da Tese

O estado da arte encontra-se exposto no Capítulo 2. Caracterizam-se os vários tipos de *kart*, e as tecnologias de fabrico comummente utilizadas.

É também abordada a temática dos veículos eléctricos, apresentando as opções de motorização e de armazenamento de energia utilizadas.

No Capítulo 3 é desenvolvido o conceito, com uma abordagem às características do produto final. O comportamento dinâmico do *kart* é analisado em várias situações possíveis dentro de pista.

É feita a selecção da tecnologia eléctrica a utilizar, implementada e testada.

São concebidos, construídos e implementados os sistemas de ajuste longitudinal da posição dos pedais do acelerador e do travão. O mesmo procedimento foi adoptado para os suportes da bateria, do motor e do controlador.

No Capítulo 4 são descritos alguns aspectos relativos à motorização e respectivo controlo. Algumas informações sobre os ciclos de carga e descarga da bateria são também explicitadas.

No Capítulo 5 é feito um pequeno relatório de custos, visando uma sucinta comparação entre o resultado até agora obtido e as opções equivalentes existentes no mercado.

As conclusões sobre todo o trabalho, bem como sugestões de trabalho futuro são indicados no Capítulo 6.

2. Estado da Arte

2.1. O *Kart*

Ao longo de 60 anos de desenvolvimento, é interessante observar as diferenças evolutivas em torno do mesmo conceito. A Figura 2 ilustra o aspecto geral de chassis actuais de competição, onde é visível por comparação com a Figura 1, essa mesma evolução:

Figura 2 - Aspecto geral de chassis actuais de competição

Estruturalmente, o *kart* tem um comportamento em pista muito peculiar, uma vez que a inexistência de um diferencial do eixo traseiro, impõe a necessidade de em curva, apenas três das quatro rodas estarem em contacto com o solo, evitando assim a perda de tracção e consequente controlo do *kart*. Este aspecto será abordado exaustivamente na secção 3.1.2, para melhor compreensão e análise do mesmo.

Conhecido esse comportamento, os chassis dos *karts* actuais têm na sua maioria uma configuração estrutural similar à da Figura 2, no entanto, existem diferenças consoante a sua aplicabilidade final, e é por isso que comercialmente podem ser divididos em duas categorias, sendo elas competição e lazer.

As versões destinadas à utilização lúdica são frequentemente encontradas nos kartódromos com serviço de aluguer. As potências dos motores estão normalmente localizadas entre os 2,6kW e os 8,7kW, referentes às cilindradas de 120cc e 390cc respectivamente. [5] Estes valores de potência demonstram-se pouco performantes quando comparados aos equivalentes utilizados em competição.

Para os utilizadores até 14 anos as velocidades atingidas são usualmente inferiores a 90km/h. Esse limite é imposto pela rotação máxima do motor e pela relação de transmissão utilizada entre o motor e o veio traseiro, uma vez que a transmissão de potência é feita sem caixa de velocidades. O sistema de travagem é normalmente de actuação mecânica por cabo.

As características técnicas dos chassis de lazer são pouco evoluídas, garantindo apenas que se apresentam como veículos fáceis e divertidos de conduzir. As manutenções são económicas, sem que exista a necessidade submeter a desgaste material de elevado nível de qualidade. Na maioria dos casos, recorre-se por isso a componentes consumíveis mais acessíveis economicamente.

Usualmente o peso de um *kart* de 200cc, sem piloto e sem combustível, é cerca de 110kg, Já os karts de 270cc poderão atingir os 119kg nas mesmas condições. [6]

Para dar resposta às necessidades do mercado de aluguer é frequente encontrar várias frotas de karts disponíveis, de diferentes dimensões de chassis, num mesmo kartódromo.

Acontece porém que as frotas de tamanho de criança são menos solicitadas o que implica uma lenta velocidade de rentabilização do investimento. A esse facto acrescentam-se as despesas de manutenção das condições logísticas adequadas para albergar todos os veículos.

Na vertente competitiva, tudo funciona de forma diferente. Os *karts* utilizados são mais velozes e eficazes, e dispõem de características mecânicas modificáveis, ao ponto de ser possível ajustar cada veículo ao respectivo condutor e modo de condução, poupando-se centésimos de segundo em pista.

A gama de potências disponíveis é muito mais alargada, chegando a atingir mais de 30kW, o equivalente a cerca de 40cv, numa cilindrada de 125cc. [7] As velocidades atingidas são muito superiores, uma vez que existem 6 relações de velocidade, sendo que em alguns circuitos a velocidade mínima praticada é de 70km/h, e a máxima de 200km/h. O sistema de travagem utilizado na maioria dos casos é hidráulico e actua no eixo traseiro e dianteiro. Nesta vertente do desporto existem regras que estipulam o peso mínimo do conjunto *kart* e piloto e, por exemplo, na categoria entre os 12 e os 14 anos, esse valor é de 145kg, com o piloto equipado a bordo, sem combustível. [8]

Os *karts* são monitorizados em pista através de tecnologia telemétrica, onde são controlados os valores de velocidade, rotação do motor, temperatura do motor, dos pneus e do líquido de refrigeração, pressão dos pneus e tempos por volta. [9]

Como resultado dos desenvolvimentos efectuados em torno das alternativas energéticas renováveis, e das iniciativas cada vez mais presentes por parte das empresas relacionadas com essa tecnologia, existem já em Portugal alguns protótipos de *karts* eléctricos.

Figura 3 – *Kart* Eléctrico "TomKart" – Com Rui Martins, colaborador da equipa Objectivo24

O primeiro *kart* eléctrico em Portugal, tal como é designado pelos responsáveis pelo projecto, foi construído e testado no kartódromo de Oiã, visível na Figura 3. Resultou de uma parceria entre a equipa *Objectivo24* e a *L-Kart*, no seguimento do plano tecnológico para as energias renováveis em vigor no anterior governo. [10]

Corria o mês de Setembro do ano de 2009, quando esse protótipo, apelidado de "*TomKart*", baseado numa conversão de motorização de um *kart* usual, foi testado em condições reais, dispondo de um motor eléctrico de 48V, com uma potência máxima de 10kW, cerca de 14cv. [11]

Mais tarde, já em Julho de 2010, é apresentado o *kart* eléctrico desenvolvido pela empresa Autosil, no âmbito do projecto *IWin!*™. A empresa tem como ramo de negócio o projecto, fabrico, comercialização e instalação de baterias para aplicações de arranque, de tracção e estacionárias. [12]

O protótipo utiliza também uma base usual de um *kart* comum, utilizando um motor eléctrico de corrente contínua sem escovas de 48V, com cerca de 5kW de potência. O armazenamento de energia é assegurado por duas baterias de lítio com 20Ah cada. O peso final do conjunto sem condutor ronda os 130kg. [13]

Figura 4 - *Kart* eléctrico da empresa Autosil em demonstração no Kartódromo do Carregado

Em Maio de 2011 foi feita uma demonstração deste protótipo no kartódromo do Carregado, num evento realizado pela Ordem dos Engenheiros. No local foram recolhidos pessoalmente registos fotográficos do mesmo, exemplo da Figura 4. Foi também discutido o conceito, principalmente alguns aspectos tecnológicos, com o Eng. Paulo Santos da empresa Autosil.

Do estrangeiro chegam também exemplos de protótipos eléctricos desenvolvidos por empresas. Desta feita, por volta do mês de Maio do ano de 2011, a *Linde Material Handling*, uma empresa alemã de renome, com 40 anos de desenvolvimento em empilhadores eléctricos, alcança um recorde mundial de velocidade com o *kart* eléctrico "*Linde E1*" desenvolvido no seio da empresa.

Figura 5 - *Kart* eléctrico da empresa *Linde-MH*

Este protótipo foi desenvolvido a partir de um chassis de competição KZ1, que na sua versão motorizada usual, dispõe de um motor de combustão, de 125cc, com cerca de 40cv, que tem acoplada uma caixa de velocidades de 6 relações. Para a conversão, foi utilizada a tecnologia dos empilhadores eléctricos, nomeadamente, o sistema de direcção, o monitor, o motor de elevação e respectivo software e controlo. O resultado de todo o *know-how* envolvido é por demais evidente, sendo que o veículo conseguiu atingir cerca de 100km/h em 3,45 segundos. O motor eléctrico é de

corrente alternada com uma potência de pico a rondar os 50kW, cerca de 68cv, alimentado por uma bateria de lítio com 96V, através de um inversor de frequência. O peso final ronda os 160kg, sem condutor, atingindo uma velocidade máxima de 120km/h. [14]

O conceito de veículo eléctrico aplicado ao *karting* está em expansão, pelo que já se encontram alguns exemplos de kartódromos com frotas eléctricas, e até já se verifica a realização de campeonatos principalmente no estrangeiro. Exemplo disso é o campeonato *ERDF Masters Kart,* realizado em França. Nesta competição são utilizados chassis de competição de última geração, movidos por motores eléctricos de corrente alternada com 65V, com uma potência a rondar os 20kW, cerca de 27cv.

As baterias são de níquel, cobalto e manganês, conhecidas pela sua alta capacidade de descarga. Na sua configuração competitiva, a autonomia destes *karts* é de cerca de 15 minutos, com um tempo de carga de 30 minutos. As velocidades atingidas rondam os 100km/h, para um peso de 123kg. [15], [16]

As frotas de aluguer compostas por *karts* eléctricos surgem principalmente em opções indoor. A empresa italiana *OTL ITALIA KARTS* é um exemplo, e tem disponíveis opções para crianças com 24V, lazer para adultos com 48V, ou de competição com 72V, capazes de atingir 140km/h. A tecnologia das baterias é sem dúvida um ponto forte, sendo que neste caso específico são utilizadas baterias de lítio-polímero.

Figura 6 - Frota de *karts* eléctricos em carregamento

Os *karts* de tamanho de adulto têm uma autonomia máxima de 20 minutos, mas normalmente são conduzidos em regime de carga máxima durante 8 ou 9 minutos, visando dessa forma reduzir o tempo de recarga para menos de 10 minutos, com carregadores trifásicos.

Neste caso, os *karts* de competição têm uma autonomia entre 8 e 15 minutos, com opção de carregamento rápido a demorar entre 20 e 25 minutos.

Estrategicamente a empresa dispõe de uma frota de 20 carros. Durante o período de carregamento de metade da frota, estão em utilização os outros dez veículos. A Figura 6 ilustra a frota de *karts* com o carregamento das baterias a decorrer.

Uma funcionalidade muito curiosa adoptada por esta empresa, é a gestão remota dos seus *karts*. Acontece que todos os veículos têm instalados vários modos de configuração electrónica, que lhes imputem determinada performance. Dessa forma, os responsáveis pela pista em questão poderão remotamente seleccionar o modo pré-configurado de performance mais adequado ao condutor, bem como, accionar a função de inversão do sentido da marcha ou até mesmo, desligar o *kart* por completo. É portanto possível manter um novo e melhorado nível de controlo comportamental no interior da pista. [17]

O *karting indoor*, como é conhecido hoje, deverá ser a primeira vertente da modalidade a sofrer alterações profundas nas suas frotas, com a substituição das existentes por renovadas opções totalmente eléctricas. Este facto traz todo o tipo de vantagens relativas à manutenção, mais simples e limpa, necessidade de extracção de fumos praticamente inexistente, menor custo de utilização de cada veículo, ainda que possivelmente mais dispendiosos no acto da compra.

2.2. Tecnologias de Fabrico Aplicadas na Produção de Chassis

Tipicamente o material utilizado na construção dos chassis é uma liga de aço Cr-Mo, uma vez que demonstra bom comportamento à fadiga, elevada rigidez e boa soldabilidade, para além de constar nos requisitos de homologação de chassis da Comissão Internacional de Karting. [18]

a) Dobragem de tubos

b) Posicionamento

c) Soldadura automatizada

Figura 7 - Produção de chassis da marca Intrepid

A tecnologia de fabrico utilizada actualmente na produção de chassis está automatizada quase na sua totalidade. O processo é composto por várias fases, algumas ilustradas pela Figura 7 a), b) e c). A primeira fase passa pela dobragem dos tubos e perfis que compõem todo o chassis, ilustrado na Figura 7 a). Estes elementos são posteriormente colocados nos jigs de soldadura, visível na Figura 7 b), para que dessa forma fique assegurada a garantia de repetibilidade do processo produtivo. Posteriormente são concretizadas as soldaduras, através de processos robotizados, exemplificado pela Figura 7 c). Assim são reduzidas as probabilidades de ocorrência de defeitos nas soldaduras, facto muito crítico neste tipo de aplicação, onde a carga dinâmica é muito exigente ao longo de toda a vida útil.

O processo de soldadura utilizado é o processo MIG, protegendo dessa forma os cordões de soldadura utilizando gases inertes, árgon e/ou hélio. [19], [20]

2.3. Tecnologia de FSW e Aplicações

Uma vez que o material base, do novo conceito estrutural apresentado neste projecto, é uma liga de alumínio, será utilizada a tecnologia de soldadura por fricção linear (Friction Stir Welding - FSW). Dessa forma suporta-se a sua vasta gama de aplicabilidade distinguida pelas excelentes características finais dos cordões obtidos.

Este tipo de soldadura surgiu há cerca de 20 anos, salientando-se desde então pela sua apetência em realizar ligações de elevada qualidade, controlo e garantia de repetibilidade, em materiais considerados difíceis de soldar através dos processos de ligação convencionais. Exemplos desses materiais são o caso das ligas leves, com forte incidência nas ligas de alumínio.

Este é um processo de soldadura no estado sólido, decorrendo portanto abaixo da temperatura de fusão dos materiais a ligar e de forma autogénea. Utiliza uma ferramenta cilíndrica, não consumível, animada de rotação e constituída por uma base e um pino de geometrias algo complexas. Para a correcta realização de um cordão de soldadura, a ferramenta descrita é introduzida na junta, em rotação, até que a base se encontre em contacto com a superfície superior das peças. Nessa situação, o pino, com perfil especial, encontra-se totalmente envolvido pela junta, terminando assim a fase de mergulho. Assim que as condições térmicas adequadas forem atingidas, é iniciado o movimento linear da ferramenta, que irá percorrer toda a junta. As fases que compõem esta sequência estão indicadas na figura seguinte:

Figura 8 – Etapas de execução de um cordão de soldadura por FSW

A ligação entre os materiais a soldar é obtida a partir de uma combinação de extrusão, forjamento e mistura dos materiais sob calor gerado principalmente a partir da deformação visco-plástica da zona processada, mas também do atrito interfacial nas zonas de escorregamento entre a ferramenta e os materiais.

Todas as juntas passíveis de se concretizar através de FSW surgem na Figura 9. Este processo é por isso muito exigente no que toca à forma e robustez do sistema de fixação das chapas ou placas a soldar. Tal facto torna-se mais perceptível depois de se observar a figura seguinte:

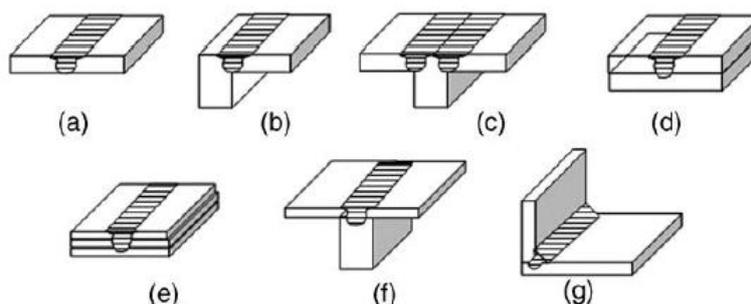



Figura 9 – Exemplos de tipos de junta executáveis por FSW: a) Topo a topo; b) Topo a topo em T; c) Junta em T com 3 peças; d) Soldadura sobreposta; e) Soldadura sobreposta com 3 peças; f) Junta em T com duas peças; g) Em canto

O equipamento disponível no Laboratório de Tecnologia Mecânica do IST, dedicado à FSW, tem a capacidade de efectuar as soldaduras com controlo alternativo de posição ou de carga aplicada pela ferramenta. A última opção confere maior homogeneidade das propriedades mecânicas ao longo do cordão, contribuindo desta forma para uma melhor qualidade da junta soldada. O sistema de fixação utilizado é de carácter standardizado.

A optimização dos parâmetros de soldadura pode ser efectuada com base na análise dos resultados adquiridos computacionalmente, aliada à comparação com os respectivos resultados experimentais. Uma vez que esses parâmetros exercem efeitos significativos no fluxo do material e distribuição de temperatura, influenciando dessa forma a evolução microestrutural do material, é fundamental a compreensão dessa influência. Este aspecto não será explorado afincadamente neste relatório, no entanto, referem-se em seguida alguns dos parâmetros inerentes ao processo, sendo exemplos a força vertical de forjamento; a velocidade de rotação da ferramenta; a velocidade de avanço linear; ângulo de ataque da ferramenta; e as características da base e do pino da ferramenta. Alguns dos parâmetros atrás indicados são ilustrados pela Figura 10.

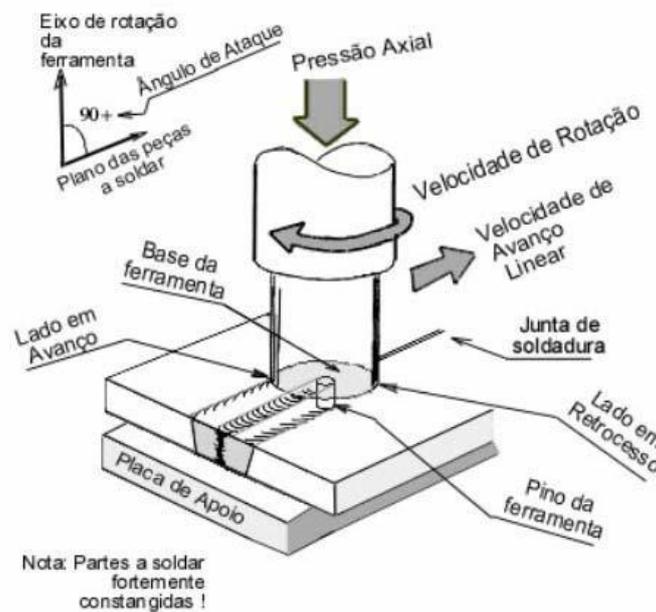



Figura 10 - Ilustração de componentes e parâmetros utilizados em FSW

A conjugação destes parâmetros determina as características térmicas, mecânicas e metalúrgicas do cordão de FSW, quer durante a realização do cordão, quer no final da ligação.

O processo de FSW é considerado como um dos mais significativos avanços em processos de ligação, sendo também identificada como uma tecnologia verde, verificada a sua eficiência energética, beneficência ambiental e versatilidade. Quando comparada com processos de soldadura considerados convencionais, a FSW consome menos energia e não requer atmosfera protegida por gás ou fluxo. A soldadura não necessita de material de adição e dessa forma qualquer liga de alumínio pode ser soldada sem que a compatibilidade entre ligas seja uma barreira. [21], [22], [23]

2.4. Tecnologia dos Veículos Eléctricos

Devido ao aumento dos preços dos combustíveis verificado a um nível mundial, aliado aos incentivos governamentais para que sejam desenvolvidos novos e mais eficientes meios de transporte, a busca exaustiva de alternativas aos combustíveis fósseis é constante e está em grande destaque na actualidade, principalmente junto dos construtores de automóveis.

No caso geral das aplicações de energia eléctrica, o resultado conflui para sistemas ambientalmente limpos, energeticamente eficientes, silenciosos e com manutenções reduzidas. Estes aspectos são apenas algumas das vantagens dos veículos eléctricos perante os veículos usuais com motores de combustão interna.

Apesar do desenvolvimento e investigação que já se verifica actualmente sobre as alternativas eléctricas, ainda se encontram alguns aspectos que, em parte, lhe conferem uma reduzida velocidade de expansão e aceitação no mercado. Alguns desses aspectos prendem-se com alto investimento inicial necessário, curta autonomia e número reduzido de opções comercialmente disponíveis. [24] Na base dessas características estão outros problemas mais primários, na medida em que muitas das vezes não são imediatamente perceptíveis ao utilizador final, sendo o custo das fontes energéticas, controlo destas últimas e infra-estruturas de rede eléctrica de carregamento, alguns exemplos deles.

Neste projecto o objectivo será o de conceber um sistema eléctrico que envolva todos os componentes eléctricos e de gestão electrónica necessários ao funcionamento do *kart*, analisando a necessidade, escolha e características de cada componente bem como as alternativas, se existirem.

Durante o relatório, serão apresentados os componentes indispensáveis ao sistema que se pretende implementar, bem como o respectivo estado da arte, implementação e enquadramento no projecto.

2.4.1. Propulsão Eléctrica

Um veículo é considerado eléctrico se a potência transmitida às rodas tiver origem num ou mais motores eléctricos. Tipicamente, os requisitos destes motores e transmissões para este tipo de aplicações são:

- Alta eficiência na gama de velocidade utilizada
- Peso comedido do conjunto
- Gama alargada de velocidade do motor com binário e potência constantes (fig.12)
- Alta fiabilidade e robustez
- Custo final viável.

Comparativamente às opções usuais de motores de combustão interna, é espectável uma maior simplicidade construtiva em todo o conjunto de transmissão de potência de um veículo eléctrico, tornando-se mais compacto, leve e eficiente.

A escolha e implementação da motorização está posteriormente dependente de alguns componentes periféricos essenciais ao seu bom funcionamento e controlo. Para retirar partido das características dinâmicas desenvolvidas pelo motor, será de considerar um estágio de relação de transmissão entre o motor e o veio de tracção. A Figura 11 ilustra esquematicamente os componentes periféricos existentes e a relação entre eles, num veículo eléctrico:

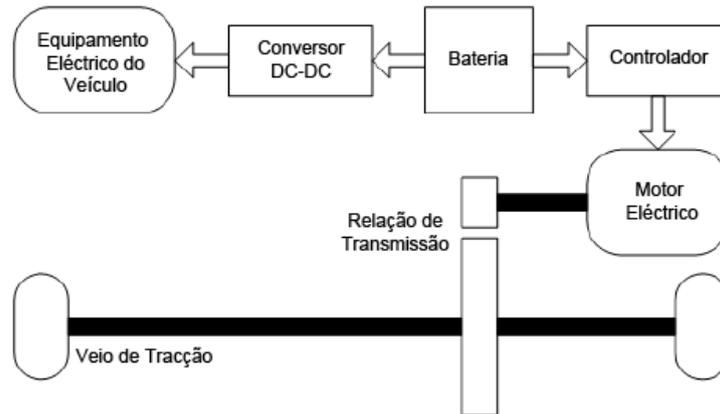



Figura 11 - Esquema do sistema típico utilizado nos veículos eléctricos

Actualmente no mercado encontram-se diversas soluções de propulsão eléctrica já implementadas: o fabricante de veículos eléctricos *TESLA MOTORS* faz uso de motores eléctricos AC de indução (ou assíncronos) trifásicos com variador de frequência. [24] Propostas concorrentes como o Nissan Leaf e o Mistubishi i-Miev vêm equipados com motores AC síncronos, de ímanes permanentes com inversor de DC para AC trifásico. [25], [26]

As características de performance de um veículo geralmente incluem tempos de aceleração (avaliada pelo tempo despendido a acelerar o veículo desde imobilizado até uma determinada velocidade), máxima inclinação que o veículo consegue ultrapassar a uma determinada velocidade, e a velocidade máxima que o veículo consegue atingir.

Como a transmissão de potência de um veículo eléctrico está maioritariamente dependente das características devolvidas pelo motor, é espectável que este consiga oferecer elevado binário a baixas velocidades para arranques e acelerações. Para altas velocidades e velocidades de cruzeiro o requisito é alta potência. Ao mesmo tempo, a gama de velocidade sob potência constante é desejada a mais vasta possível. [27]

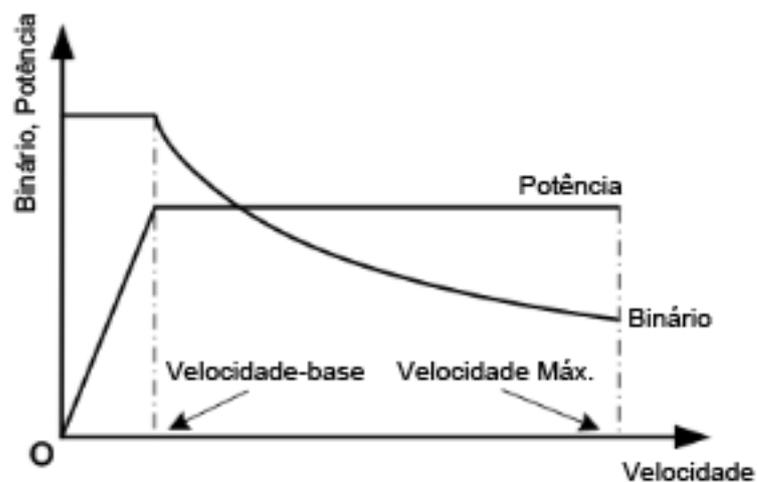



Figura 12 – Características pretendidas num veículo eléctrico (motor AC de indução)

A Figura 12 ilustra as curvas de potência e binário ao longo da gama de rotação de velocidade de um motor AC de indução pretendidas para um veículo eléctrico. Na realidade, a zona de potência constante conseguida nestes motores é proporcionalmente menor à ilustrada.

A velocidade-base é a que está associada à frequência base – nominal – do motor, atingida no instante em que a tensão de alimentação iguala o valor nominal, sendo também máxima neste caso. A partir desse ponto, apenas se varia a frequência do campo girante do estator. [27], [28]

Posteriormente serão abordados os diversos tipos de motores utilizados com mais pormenor.

2.4.2. Motor Eléctrico: Critérios e Opções

A selecção de um motor eléctrico é uma etapa muito relevante que requer especial atenção na fase de projecto de um veículo deste tipo. De facto, a indústria automóvel continua em busca do motor eléctrico mais apropriado. Para que a decisão seja tomada de uma forma coerente e precisa é necessário ponderar diversos aspectos, alguns dos quais são indicados em seguida:

- Binário elevado a baixa velocidade (necessário em arranques e subidas)
- Potência elevada a alta velocidade (necessário em velocidade cruzeiro)
- Gama alargada de velocidade em zona de potência constante
- Alta eficiência sobre a gama de velocidade
- Alta eficiência para travagem regenerativa
- Tamanho e peso comedidos
- Alta fiabilidade e robustez
- Preço viável
- Boa tolerância a falhas

No caso específico de transmissões indirectas de potência, o requisito de velocidade máxima do motor depende da velocidade máxima do veículo, do raio da roda do veículo e da relação de transmissão utilizada. Já para transmissões directas de potência, o requisito de velocidade máxima do motor apenas depende dos primeiros dois parâmetros.

Relativamente às opções de motorização, existem duas grandes categorias de motores eléctricos, separadas pela diferença do tipo de alimentação: corrente alternada (AC) ou contínua (DC). Na indústria automóvel tem-se verificado o uso mais centrado em quatro tipos de motores, sendo eles: motores de corrente contínua com escovas; motores trifásicos síncronos de corrente contínua com ímanes permanentes e sem escovas; motores trifásicos de indução (ou assíncronos); e motores trifásicos síncronos de relutância variável. [27] , [29]

A escolha do motor eléctrico irá condicionar em grande medida a maior ou menor complexidade na gestão electrónica do veículo.

A análise comparativa entre as opções atrás indicadas pretende salientar as razões pelas quais são utilizados esses motores, bem como estabelecer parâmetros comparativos entre eles.

O anexo A1 ilustra o universo de motores eléctricos disponíveis no mercado, salientando em cor verde aqueles que se encontram já comercializados em veículos eléctricos. [30]

Para esclarecer a escolha deste tipo de motores, atente-se na breve exposição apresentada para cada um deles:

- Os motores DC com escovas são os motores mais simples que se podem usar em aplicações automóveis, sendo muito conhecidos pela sua capacidade de fornecer binários elevados a baixas velocidades e pelas suas características binário-velocidade para aplicações com requisitos de tracção. Apesar disso, são motores pouco eficientes, com pouca fiabilidade e que necessitam de manutenção, principalmente devido à presença de escovas. É difícil reduzir o tamanho destes motores, e por isso, tornam-se motores pesados, e têm ainda a acrescentar o facto de as escovas, devido à fricção imposta, limitarem a velocidade máxima de rotação do motor.
- Os motores trifásicos síncronos de corrente contínua com ímanes permanentes e sem escovas podem por vezes gerar dúvidas em relação ao seu funcionamento. Uma das causas são as diferentes designações que os fabricantes utilizam entre si, para o mesmo tipo de motor, por exemplo: motores síncronos de ímanes permanentes, motores AC auto-síncronos, motores síncronos de frequência variável ou motores comutados electronicamente.

Para esclarecer este aspecto, saliente-se estes motores não são verdadeiramente de corrente contínua. O que acontece é que, de facto, o seu funcionamento requer corrente alternada que deverá apresentar uma frequência variável. Assim, a fonte é de corrente contínua mas através de inversores de frequência incorporados (entre outro equipamento electrónico), esta é transformada em alternada trifásica.

Estes motores são os mais eficientes das restantes alternativas, o binário é elevado a baixas rotações e diminui à medida que a velocidade aumenta. Uma desvantagem é por exemplo o preço comparado aos outros tipos de motor.

- Os motores assíncronos ou de indução (em vez de utilizarem ímanes permanentes, a corrente é induzida ao rotor para criar um íman temporário) são escolhidos para este tipo de veículos devido à sua simplicidade, robustez, manutenção reduzida e grande gama de velocidade. No entanto, o controlo destes é mais caro do que os motores DC.

Existem três parâmetros que podem ser manipulados no intuito de variar a sua velocidade, sendo eles, a frequência da tensão de alimentação, o número de pólos e o escorregamento. Actualmente o método mais eficiente reside na utilização de inversores de frequência. Estes inversores transformam uma tensão de amplitude e frequência constantes, numa tensão de amplitude e frequência variáveis. Variando-se a frequência da tensão de alimentação varia-se também a velocidade do campo girante do estator e consequentemente a velocidade de rotação da máquina.

O tamanho de um motor de indução é geralmente maior quando comparado com um motor de ímanes permanentes com valores de potência e velocidade da mesma ordem de grandeza. [28]

- Os motores de relutância variável (MRV), são motores AC trifásicos síncronos e têm vindo a ganhar interesse como candidatos aos veículos de propulsão eléctrica dada a sua simples construção e controlo, e possibilidade de operar a altas velocidades com uma larga gama de potência constante. Se forem requeridas altas velocidades, tipicamente 10.000 r.p.m., estes motores são capazes de satisfazer o critério naturalmente. Já para os motores de indução, a velocidade

máxima é geralmente inferior a essa marca. Estas vantagens proeminentes são atractivas para uma aplicação que envolva tracção. Apesar de tudo, como os MRV ainda não estão a ser produzidos em grande escala, o custo poderá ser mais elevado quando comparado ao motor de indução. [31]

Para comparar, de uma forma simples, alguns dos factores mais influentes na escolha de um motor eléctrico, pode construir-se a seguinte tabela com pesos de 0 (mínimo) a 5 (máximo): [28]

Tipo de motor	DC com escovas	Indução	DC de ímanes permanentes sem escovas	Relutância Variável
Eficiência	2	4	5	4.5
Peso	2	4	4.5	5
Custo	5	4	3	4
Total	9	12	12.5	13.5

Tabela 1 – Comparação entre diferentes tipos de motores eléctricos [28]

A tolerância a falhas é também uma característica importante durante o projecto de um veículo eléctrico. Quando um componente falha, é necessário que exista redundância incorporada no veículo eléctrico para que este possa operar até que a manutenção seja efectuada. No entanto, o nível de redundância poderá subir, mas, acompanhado de um elevado custo. O facto de os motores de relutância variável serem naturalmente tolerantes a falhas torna-os muito apelativos.

No que toca à segurança e fiabilidade, os motores de relutância variável são superiores em relação aos restantes três tipos.

Sumariamente, depois de avaliados os quatro tipos de motores, pode concluir-se que os de relutância variável são a escolha mais equilibrada para aplicações automóveis ao nível industrial, balanceando os critérios de eficiência, peso, custo, velocidade máxima, tolerância a falhas, segurança e fiabilidade. [27], [32]

2.4.3. Tecnologias de Armazenamento de Energia

As tecnologias de armazenamento de energia que tem vindo a ser utilizada em veículos eléctricos centra-se no uso de baterias recarregáveis e de ultracondensadores. Estas unidades podem ser recarregadas através dos motores eléctricos dos veículos (aquando do seu funcionamento como geradores), ou através da rede de energia eléctrica.

Estes são os elementos que fornecem energia ao sistema de propulsão do veículo, sendo que, a função principal dos ultracondensadores é acautelar situações de exigência repentina de potência.

- *Requisitos das unidades de armazenamento de energia*

As unidades de armazenamento de energia deverão estar projectadas para armazenar uma determinada quantidade de energia (kWh), suficiente para providenciar picos de potência adequados (para que o veículo cumpra uma performance específica de aceleração), assegurando também a

capacidade de cumprirem com determinados ciclos de condução reais. A utilização cíclica destes componentes estará directamente relacionada com os respectivos períodos de vida útil, maiores ou menores, sendo este outro dos aspectos considerados na fase de projecto do veículo.

Estes requisitos vão variar significativamente dependendo do tipo de tecnologia utilizado, isto é, se se trata de um veículo totalmente eléctrico, com pilha de hidrogénio ou híbrido.

Uma das dificuldades na fase de projecto é estabelecer um equilíbrio entre os requisitos de peso, volume e custo das unidades de armazenamento de energia, dado que existem limites (peso, custo, volume) que poderão direccionar ou não o projecto para o sucesso comercial. Impor limites práticos para atingir concepções funcionais é portanto uma tarefa complexa.

No caso de um veículo totalmente eléctrico, a capacidade da bateria pode ser especificada para cumprir com uma determinada autonomia do veículo. O peso e o volume da bateria poderão ser calculados através de uma estimativa do consumo de energia (Wh/km) do veículo e da densidade de energia (Wh/kg) da bateria, descarregada durante o ciclo de teste adequado (potência vs tempo). No entanto, não sendo o cálculo destes valores à primeira vista muito complexo, para determinados tipos de tecnologia não é tão simples como aparenta, dado que é necessário considerar diversos valores de eficiência para fazer tal determinação.

Na maioria dos casos, a bateria projectada para uma determinada autonomia consegue devolver a potência necessária (kW) não só para obter a performance de aceleração desejada, como também para superar a inclinação máxima que o veículo deverá conseguir subir a uma determinada velocidade. Irá também determinar a velocidade máxima de cruzeiro do veículo.

Neste tipo de aplicações, as baterias são regularmente descarregadas e posteriormente recarregadas utilizando a rede eléctrica nacional, para maiores períodos de carregamento. Assim, os ciclos de vida, número de ciclos carga-descarga, são um ponto a considerar e é essencial que as baterias cumpram um requisito mínimo.

A especificação dos requisitos de armazenamento de energia é crítica para o projecto e para os casos de grupos de propulsão que usam ultracondensadores. Estes componentes disponibilizam cargas e descargas efectuadas muito rapidamente, poupando a bateria a essas solicitações. Estes componentes serão oportunamente discutidos, na sequência do tema.

Tal como irá ser discutido mais à frente, o requisito de energia (Wh) depende fortemente da estratégia utilizada para controlar a carga e descarga do ultracondensador.

Para o projecto de um veículo, terá que ser dada especial atenção à optimização do projecto da bateria (características de energia e potência) para que vá de encontro ao equilíbrio entre capacidade de armazenamento (A.h) e potência (kW) disponível.

- *Baterias - Generalidades*

Relativamente aos tipos de baterias utilizados, os que estão hoje aptos para aplicações em veículos eléctricos são as de chumbo-ácido, do tipo de hidretos metálicos de níquel e do tipo de lítio.

Os mais recentes desenvolvimentos de baterias têm considerado baterias de baixa densidade de energia (Wh/kg) para os veículos puramente eléctricos. As baterias para estes veículos possuem células de maior capacidade (Ah) quando comparadas com as dos veículos híbridos.

Embora as voltagens dos dois sistemas sejam comparáveis, a energia armazenada numa bateria de um veículo híbrido é muito mais reduzida que a de um veículo totalmente eléctrico.

A maioria dos carros totalmente eléctricos utiliza baterias de lítio, já os híbridos, na sua maioria, comportam baterias de hidretos metálicos de níquel. As últimas por sua vez oferecem uma maior densidade de potência (kW/kg) e um maior período de vida útil (maior número de ciclos carga-descarga).

Existe outro tipo emergente de baterias, as de lítio-polímero. Estas diferem das baterias de lítio usuais na medida em que as últimas implicam um electrólito aquoso. Quando se trata de baterias de lítio-polímero, é usada uma malha polimérica para separar o cátodo do ânodo e o electrólito é gelatinoso ao invés de líquido. Esta construção é menos propícia a incendiar-se que as baterias de lítio usuais, sendo portanto mais seguras. Até há bem pouco tempo, as baterias de lítio-polímero exigiam um processo de produção mais complexo quando comparado ao das baterias com electrólito do tipo aquoso. No entanto, com a evolução dos processos produtivos, este tipo de tecnologia mostrar-se-á mais disponível no mercado de ora em diante. [33]

Existem alguns termos que poderão ser empregues para melhor caracterizar os aspectos funcionais das baterias, e são eles:

- O estado de carga [%] (SOC – state of charge): é uma expressão da capacidade actual da bateria, em relação à capacidade máxima registada no último ciclo carga-descarga. Tipicamente este valor é calculado usando um cálculo integrativo da corrente, para determinar a variação da bateria ao longo do tempo. [34]

- Profundidade da descarga (DOD – depth of discharge %): trata-se da percentagem de capacidade da bateria que já foi descarregada, medida em percentagem em relação à máxima capacidade do último ciclo carga-descarga.

- Taxa C: É a taxa de carregamento ou descarregamento de uma célula de bateria, expressa em termos da capacidade total em Ah. Como exemplo, uma taxa de 1C traduz a transferência de toda a energia armazenada, no período de uma hora. Se a taxa for de 0.1C, significa 10% da energia total transferida em uma hora, ou toda a energia em 10 horas. Se por outro lado a taxa for de 5C, significa que a transferência da energia total se faz em 1/5 de hora, 12 minutos portanto.

- Potência específica [W/kg]: quantidade de potência obtida por cada quilograma da bateria, medida em W/kg. Um maior valor, significará maior facilidade em entregar energia de forma rápida.

- Energia específica [Wh/kg]: quantidade de energia por cada quilograma da bateria. Um valor elevado de energia específica significa que a bateria pode armazenar muita energia, mas não implica que a consiga fornecer de uma forma rápida, o que aconteceria se tivesse elevada potência específica. [35]

A tabela seguinte apresenta um resumo das características das baterias para os veículos eléctricos (EV) e híbridos (HEV), na qual se podem observar as diferenças entre as necessidades destas duas aplicações, para marcas como a *Panasonic* e *Saft*:

Tecnologia da Bateria	Aplicação	Ah	V	Wh/kg	W/kg
Chumbo-ácido					
Panasonic	EV	60	12	34.2	250
Panasonic	HEV	25	12	26.3	389
Hidretos metálicos de níquel					
Panasonic	EV	65	12	68	240
Panasonic	HEV	6.5	7.2	46	1093
Lítio					
Saft	EV	41	4	140	476
Saft	HEV	12	4	77	1550

Tabela 2 – Características dos vários tipos e marcas de baterias com aplicações em veículos eléctricos e híbridos

Observem-se as diferenças entre os valores de potência específica das baterias empregues nos diferentes veículos, visíveis na Tabela 2. Estes valores são muito mais elevados para os veículos híbridos, uma vez que estes não são projectados para elevadas autonomias no regime puramente eléctrico. Nesse sentido, as baterias são tipicamente optimizadas para providenciar elevados valores de potência específica, uma vez que os valores de aceleração do veículo estão largamente dependentes desta característica. [31]

Segue-se uma breve abordagem aos diferentes tipos de bateria disponíveis no mercado, para que se evidenciem as diferenças entre eles.

- *Baterias de Chumbo-Ácido*

Actualmente estas baterias são fabricadas em grandes volumes de produção, pelo que se tornam numa fonte de energia disponível a um custo relativamente baixo. A acrescentar a esse facto, a sua tecnologia está muito amadurecida dada a sua intensa utilização durante os últimos 50 anos.

No entanto, as baterias de chumbo-ácido não são adequadas para descargas acima de 20% da sua capacidade nominal. Quando são sujeitas a um estado muito diminuto de carga as baterias passarão a ter ciclos de vida mais limitados. As densidades de energia e de potência são baixas devido ao peso dos electrodos de chumbo. Desenvolvimentos na investigação revelaram que a densidade de energia poderá ser aumentada utilizando outro tipo de electrodos, não corrosivos.

Esta tecnologia está muito desenvolvida, é fiável e é barata, sendo mundialmente utilizada para a ignição e iluminação de veículos, no entanto, estas baterias não são muito susceptíveis a ciclos. São portanto projectadas para funcionarem a baixas temperaturas, para a função de ignição dos motores de combustão, e para fornecer alguma potência em caso de falha do alternador, ou do motor, sendo mínimos os requisitos cíclicos.

- *Baterias de Lítio*

Este tipo de baterias tornou-se um foco de desenvolvimento desde o ano de 1997. Demonstram grande apetência para aplicações em veículos totalmente eléctricos, uma vez que possuem características de energia e potência específicas muito convenientes a essas aplicações. Embora a sua produção seja dispensiosa, e exista a necessidade de um rigoroso controlo electrónico, elas são um foco de desenvolvimento actual. Estas baterias oferecem uma maior densidade energética que as restantes alternativas.

Actualmente dominam o mercado das aplicações móveis, como são exemplo os telemóveis, computadores portáteis e câmeras digitais. Estão a começar a ser utilizadas para ferramentas e vão continuar a expandir-se comercialmente.

As características de energia e potência específicas melhoraram rapidamente nos últimos anos, e os preços têm-se reduzido como resultado de um aumento de eficiência produtiva por parte dos fabricantes, que enfrentam também um forte mercado concorrente. São frequentemente disponibilizadas em células individuais de pequena voltagem, fazendo-se posterior uso de ligações em série e em paralelo para se atingir as caraterísticas desejadas de voltagem e capacidade. A Figura 13 ilustra um conjunto de células individuais de lítio, constituintes de uma bateria de testes. [36]

Este tipo de baterias está em constante desenvolvimento não só para aplicações de baixas capacidades nos veículos híbridos, mas também para os veículos híbridos plug-in, estes já com a capacidade de serem conectados à rede eléctrica, dispondo de uma maior autonomia em modo totalmente eléctrico.

Figura 13 – Conjunto de células de lítio individuais

- *Baterias de hidreto de níquel metálico (NiMH)*

Este tipo de baterias é de segura utilização a altas voltagens, suportam um elevado número de ciclos de vida, elevadas temperaturas de funcionamento e apresentam boa tolerância a sobrecargas e subcargas. Os seus componentes são insensíveis ao ambiente circundante e podem ser recicladas. [37]

São utilizadas na maioria dos veículos híbridos a circular até ao momento e têm vindo a ser optimizadas para ciclos de carga-descarga intensos e altamente repetitivos.

O controlo térmico da bateria é essencial e tipicamente é adoptado um regime máximo de operação a 50ºC, com curtas permanências a 60ºC. Para temperaturas acima de 70ºC poderão

ocorrer danos permanentes. As células estão no entanto munidas de uma válvula de emergência que lhes permitirá reagir a situações de sobrecarga ou curto-circuito.

A *Panasonic* tem trabalhado em colaboração com a *Toyota* no projecto *Prius*, e consegue agora oferecer baterias com redução de peso substancial face ao lançamento inicial desse veículo, bem como melhoramentos nas características de potência específica da bateria. A primeira geração do *Prius* em 1997 utilizava um pack de baterias com cerca de 100kg, a segunda geração surgiu no ano de 2000 e conseguira uma redução do peso para cerca de 75kg. Na versão de 2003-2009 o pack pesava já cerca de 40kg, o semelhante ao peso da versão actual (2009-Presente).

- *Conclusões sobre as opções descritas de baterias*

A grande maioria dos veículos híbridos comercializados utilizam baterias de hidretos metálicos de níquel, uma vez que oferecem boas características de potência, numero elevado de ciclos de vida, e uma estimativa de duração longa, para além de uma boa densidade energética. Estas baterias têm sido melhoradas substancialmente num curto período de tempo, e continuam a evoluir positivamente. No entanto, têm também um alto custo por kWh de energia armazenada, devido aos grandes aumentos que se têm vindo a verificar no preço dos materiais utilizados.

As baterias de lítio são o recurso actualmente utilizado para aplicações comerciais principalmente em veículos totalmente eléctricos, ainda que o desenvolvimento destas para os veículos híbridos esteja muito avançado. Este tipo de baterias oferece maiores densidades de potência e energia, a um preço comparável às baterias de NiMH, com tendência para descer.

Para que se implementem em veículos híbridos, ainda terão de ser assegurados períodos de vida útil mais longos, e para grandes capacidades, a engenharia de segurança é prioritária. Estas baterias são mais complexas electronicamente que os outros tipos de baterias uma vez que é necessário controlo electrónico ao nível de cada célula, individualmente. [38]

Para aplicações específicas em *karts*, a informação é ainda relativamente limitada, no entanto, nos desenvolvimentos encontrados na bibliografia, pode ser verificado que a escolha recai maioritariamente sobre baterias de lítio, tipicamente do tipo LiFePO4.

Uma das evoluções deste tipo de baterias foi já desenvolvida e aplicada, desta feita o tipo é LiFeYPO4. São mais seguras e disponibilizam um maior período de vida útil, até 10 anos. Além destes aspectos, a evolução verificada ao nível químico, permite ainda redução do peso e aumento das correntes de carga e descarga.

Existem projectos já desenvolvidos com a tecnologia de LiFeYPO4, onde foi conseguida uma capacidade específica na ordem dos 6,7Ah/kg, uma clara diferença para os valores usuais das baterias de LiFePO4 que podem rondar 1,6Ah/kg. [39]

- *Ultracondensadores*

Os ultracondensadores são uma tecnologia (sob desenvolvimento para aplicações em veículos automóveis desde os anos 90) que permite armazenar vinte vezes mais energia que um condensador normal. Como termo de comparação, uma simples bateria de chumbo-ácido pode armazenar dez vezes mais energia que um ultracondensador, no entanto, a grande vantagem é a de

poderem ser carregados e descarregados um sem número de vezes sem que a sua performance seja afectada. Estas características podem ser usadas em combinação com as baterias electroquímicas para melhorar os períodos transientes de performance de um veículo eléctrico, aumentando dessa forma a vida útil das baterias.

Descargas súbitas e rápidas da bateria durante as acelerações, ou cargas rápidas durante a travagem regenerativa podem ser evitadas com a ajuda dos ultracondensadores. Para além disso, estes permitem travagem regenerativa mesmo quando as baterias estão totalmente carregadas.

De uma forma resumida, o funcionamento destes elementos é solicitado quando o veículo se encontra em aceleração e a voltagem da bateria sofre uma redução momentânea, facto que é traduzido numa indicação para o sistema de controlo requerer energia ao ultracondensador. Numa situação oposta (travagem regenerativa), a voltagem da bateria sofre um aumento, e portanto o controlo proporciona o armazenamento da energia cinética do veículo, depois de convertida em eléctrica, no ultracondensador.

Para justificar o desenvolvimento dos ultracondensadores como uma tecnologia distinta das baterias de alta potência, é crítico que as suas características de potência e vida útil sejam significativamente superiores a estas últimas, uma vez que a densidade de energia dos condensadores será significativamente menor que no caso das baterias. A evolução tem sido direcionada no sentido de obter uma densidade de energia de no mínimo 5 Wh/kg para descargas de alta potência. Em relação ao período de vida útil, pretende-se atingir no mínimo 500.000 ciclos de descargas profundas. [31]

O uso de ultracondensadores a par das baterias é tecnicamente atractivo para tirar melhor partido de ambos os componentes, apesar dos ultracondensadores serem dispendiosos. No entanto poderão oferecer características atractivas se funcionarem em conjunto com baterias de chumbo-ácido. [38]

A Tabela 3, recorrendo a dados relativos às características mais relevantes deste tipo de componentes, estabelece uma comparação entre as comuns baterias de chumbo-ácido e os ultracondensadores. [40]

Característica	Bateria Chumbo-Ácido	Ultracondensador
Tempo de carregamento	De 1 a 5h	De 0.3 a 30s
Tempo de descarregamento	De 0.3 a 3h	De 0.3 a 30s
Energia (Wh/kg)	De 10 a 100	De 1 a 10
Ciclos de vida	~1000	> 500.000
Potência Específica	<1000	<10.000
Eficiência da carga/descarga	0.7 a 0.85	0.85 a 0.98

Tabela 3 – Comparação entre tecnologias de armazenamento de energia

2.4.4. Controlo Electrónico e Gestão das Fontes de Energia

A electrónica de potência é uma tecnologia que abre as portas ao desenvolvimento destes veículos e à implementação de arquitecturas eléctricas avançadas, para ir de encontro às exigências do aumento de capacidade energética.

Os desenvolvimentos neste campo também vão permitir corresponder às exigências de potência eléctrica, devido ao aumento do uso de recursos electrónicos para melhorar a performance do veículo, a economia de combustível, nível de emissões (no caso do veículo híbrido), conforto dos passageiros e a segurança destes.

Neste sentido, em aplicações como *steer-by-wire* e *brake-by-wire*, motores de resposta rápida, inversores e sistemas de controlo são essenciais e deverão ser capazes de operar em ambientes adversos, procurando respeitar as características indicadas anteriormente.

A gestão electrónica tipicamente utilizada no controlo de veículos eléctricos pode ser esquematicamente ilustrada pela figura seguinte:

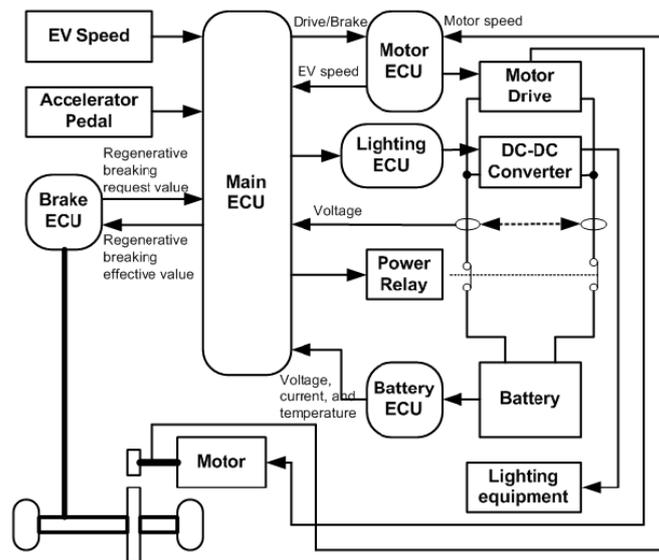



Figura 14 - Aspecto esquemático do controlo de veículos eléctricos

O sistema de controlo destes veículos inclui normalmente cinco unidades electrónicas de controlo (*Electronic Control Units - ECU*) que são: a unidade de controlo principal, de controlo do motor, da bateria, dos travões e de equipamento eléctrico. A unidade de controlo principal controla o binário disponível através da gestão do binário do motor, segundo os dados recolhidos do acelerador e da unidade de comando da velocidade do veículo. O valor do binário necessário é enviado à unidade de controlo principal que, de acordo com o binário debitado no mesmo instante pelo motor, solicita a unidade de controlo do motor para se ajustar ao valor que está a ser requisitado.

Através da coordenação do esforço de travagem com o sistema de travagem regenerativa que é executada pelo motor, a unidade de controlo dos travões gere o binário de travagem entre o sistema de travagem regenerativa e a actuação do sistema hidráulico dos travões.

A unidade de controlo da bateria monitoriza o estado do carregamento e do descarregamento da bateria. Geralmente, o controlo inclui a detecção de derrames, de voltagens, correntes e temperaturas anormais.

A unidade de controlo de equipamentos eléctricos, controla o conversor DC-DC para este gerar diversos níveis de voltagens DC para iluminação e outros equipamentos.

- *Controlo e gestão da bateria*

A monitorização das baterias é altamente crítica nos veículos que as comportam, uma vez que podem comprometer a segurança dos passageiros, do veículo e da sua operacionalidade. Manter este controlo permanente é a principal função do BMS (*Battery Management System*) que verifica e controla o estado da bateria, através de dispositivos sensoriais, tendo em conta as condições seguras de utilização.

A performance de uma bateria em funcionamento é baseada em reacções químicas. Dessa forma, a bateria degrada-se internamente com o tempo e com a utilização, reflectindo-se numa redução gradual da sua capacidade de armazenamento. O processo de decaimento necessita de ser reduzido, o que é conseguido controlando o perfil de carga e descarga.

Geralmente, a vida da bateria irá diminuir se a bateria for operada dentro de uma gama alargada de temperaturas, e ciclos frequentes de cargas e descargas profundas, particularmente aquando de grandes solicitações de corrente.

Assim, o BMS, que é flexível à protecção de baterias de tipos diferentes e que pode promover diversas funções de segurança, tem vindo a ser tópico de recentes desenvolvimentos em sistemas de energia alternativa. A Figura 15 ilustra uma placa de circuito impresso com o sistema BMS já implementado, num conjunto de células individuais de bateria de lítio.

Figura 15 – Placa de circuito BMS implementada em conjunto de células individuais.

- *SOC – Estado de carga da bateria*

Um dos parâmetros requeridos para assegurar a correcta carga e descarga da bateria é o já referido SOC. Este parâmetro indica o estado actual de carga da bateria e possibilita o carregamento e o descarregamento em segurança, a um nível de controlo que promove a extensão e protege a vida da bateria.

Uma estimativa precisa do SOC previne danos na bateria e o seu rápido envelhecimento. No entanto a obtenção deste parâmetro é complexa, uma vez que se vê afectado da eficiência da bateria, e das temperaturas geradas pelas reacções químicas durante o funcionamento.

Existem várias formas de calcular o SOC, por exemplo, através de modelos empíricos, estatísticos ou através de modelos de inteligência artificial. Os métodos clássicos passavam por medir a carga já extraída, a impedância interna da bateria ou voltagem da bateria sem carga aplicada, mas nenhum deles, isoladamente, poderia ser manipulado de forma a devolver resultados concisos.

Pode ser feita uma aproximação razoável procedendo ao descarregamento total da bateria, nível este que é atingido quando a bateria deixa de conseguir alimentar o sistema a que está ligada. No entanto, o nível máximo de carga deteriora-se com o tempo. Esta degradação é considerada por alguns autores linear ao longo do tempo, se o descarregamento ocorrer com um perfil periódico de corrente. [41]

Com base nessa aproximação, é proposta por alguns autores, uma rede neuronal, mapeada como uma função da impedância da bateria, carga extraída e voltagem da bateria em aberto, dados recolhidos pelos sensores implementados. Naturalmente, a estimativa da rede neuronal é mais precisa se o período de treino for grande e abranger todas as condições operativas possíveis. [36], [42]

2.5. Segurança

Uma vez que não foi encontrada informação sobre o tema de colisões aplicadas aos *karts*, e com base na semelhança entre componentes utilizados, consideraram-se os resultados da pesquisa para os veículos eléctricos comuns de passageiros. Sendo desde logo importante salientar que esses veículos vieram trazer novas vertentes de análise de colisões entre veículos. Uma vez que o órgão propulsor dos veículos eléctricos é um conjunto de baterias, as colisões de veículos deste tipo são diferentes das mesmas nos veículos tradicionais, principalmente devido às altas voltagens praticadas a bordo.

O relatório de avaliação global de segurança *International Center for Technology Assessment (ICTA)* indica os problemas mais críticos dos veículos eléctricos em caso de colisão, sendo alguns deles: risco de incêndio, problemas de queimaduras com vapor, calor ou produtos químicos, problemas com choques eléctricos, defeitos de fabrico, entre outros.

- *O estado actual do estudo da segurança das colisões de veículos eléctricos*

A segurança dos automóveis pode ser dividida em duas categorias: segurança activa e passiva. A segurança activa refere-se a tomar medidas precocemente, visando evitar colisões. A segurança passiva refere-se ao projecto de segurança do veículo, quer em termos estruturais, quer em termos de dispositivos de segurança passiva (airbags, pré-tensores dos cintos de segurança, coluna de direcção retráctil, encostos de cabeça com altura regulável, entre outros).

Estudos prévios relacionados com a colisão de veículos foram levados a cabo sob as mais variadas condições de impacto, acontece porém, que este tipo de teste se revela muito dispendioso quer em recursos humanos quer em recursos materiais. A Figura 16 ilustra um instante no ensaio de crash-test de um Nissan Leaf, comercialmente disponível.

Figura 16 - Teste EuroNCAP - Nissan Leaf 80kW

Com o método dos elementos finitos explorado na área da engenharia mecânica, e com o rápido desenvolvimento dos computadores, um grande número de investigadores começaram a estudar computacionalmente as colisões de veículos. A indústria automóvel começou a investigação em simulações de impacto de veículos a partir de meados dos anos 60, sendo que, na China o estudo ainda não tinha começado até ao final dos anos 80. Actualmente a investigação de colisões entre veículos é basicamente desenvolvida apenas com métodos de simulação computacional.

Como os veículos eléctricos diferem dos veículos usuais quer na forma como armazenam energia, quer na forma como são propulsionados, os testes de impacto não devem só cumprir com as regulamentações já existentes: Protecção de Ocupantes, Protecção em Impactos Traseiros, Normas de Protecção de Ocupantes em Impactos Frontais e Laterais. Estes deverão também cumprir com normas específicas para veículos eléctricos: Requisitos de segurança em caso de fuga de electrólito, e instalações eléctricas e Teste à integridade do sistema de armazenamento de energia.

Os testes de colisão de veículos incluem três ensaios: colisão de veículos reais, colisão de veículos “puxados” e testes de bancada de componentes. Os testes de veículos reais são os mais básicos e assertivos métodos que desenvolvem a segurança dos veículos e conseguem devolver os resultados mais exactos porque são os testes mais semelhantes aos acidentes. Há no entanto algumas desvantagens nomeadamente preparações complexas, altos custos envolvidos, e grande demanda de equipamento.

Os testes de impacto com veículos reais são maioritariamente utilizados para conferir se o modelo final do veículo está de acordo com todas as normas e regulamentos. Existem duas entidades que regem este tipo de legislação de segurança passiva: uma delas nos Estados Unidos conhecida como *Federal Motor Vehicle Safety Standards*, e outra na Europa, o sistema legal Europeu (estando incluídas a Comissão Económica para a Europa das Nações Unidas, e a Comunidade Económica Europeia).

Para terminar, as recomendações de segurança mais pertinentes são a conveniente fixação e instalação do sistema de baterias, ligações robustas interna e externamente à bateria, e a monitorização permanente da voltagem e temperatura das baterias.

3. Desenvolvimento do Produto

3.1. Desenvolvimento de Conceito

3.1.1. Conceito Estrutural

O foco inicial de desenvolvimento deste projecto encontra-se na base estrutural do mesmo. O objectivo proposto foi o de desenvolver uma alternativa estrutural aos chassis utilizados na actualidade, passando pela utilização integral de alumínio. Desta forma, seria utilizado maioritariamente o processo de *friction stir welding*, garantindo a qualidade e homogeneidade de todas as soldaduras, procurando aumentar o tempo de vida útil da componente estrutural.

Aliada à utilização de uma liga de alumínio, vem por um lado associada a vantagem da redução de peso do conjunto final, por outro lado, vem também a necessidade de garantir que o chassis permanece com as características de rigidez necessárias ao bom comportamento torsional do veículo em pista. Para isso, durante o desenvolvimento da solução estrutural, foram adoptados quatro vectores de orientação para a inovação inerente a este processo, especificamente:

- Durante o processo de modelação, foi sempre tida em consideração a premissa de *projectar para construir*. Mais concretamente, algumas das soluções construtivas encontradas passam pela necessidade de recorrer a operações de quinagem e corte por arranque de apara. Nesse sentido, a modelação foi direcionada para aspectos como garantir a perpendicularidade entre a direcção de laminagem da placa a utilizar e a direcção do eixo de dobragem da operação de quinagem. Foram também evitadas características morfológicas das peças a construir inadequadas às ferramentas de corte por arranque de apara disponíveis nos equipamentos.

- Depois de reunidos todos os componentes necessários à montagem, sucedem-se as operações de soldadura. Como tal, existem aspectos físicos que limitam a realização de determinados cordões de soldadura. Nesse sentido, a modelação efectuada procurou ajustar-se construtivamente às características do cabeçote móvel da máquina de soldadura. Para conferir graficamente a possibilidade de execução dos cordões de soldadura necessários, foi modelado o cabeçote móvel da máquina em SolidWorks®, visível na Figura 17. Desta forma, e conhecendo a dimensão espacial do

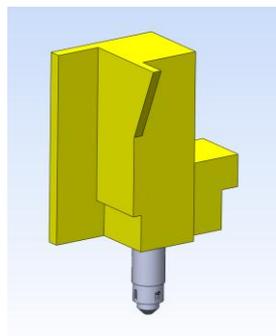



Figura 17 - Modelação 3D do cabeçote móvel da máquina de soldadura FSW

plano de trabalho da máquina, era possível com maior facilidade avaliar a capacidade execução dos cordões de soldadura.

- A maior parte dos componentes periféricos do kart requerem pontos de apoio específicos, e estão colocados estrategicamente por diversas razões, de funcionalidade por exemplo, ou até de equilíbrio dinâmico, contribuindo para uma conveniente distribuição de peso. Algumas das soluções existentes nos chassis comuns, aliam a componente funcional à estrutural. Foi também com essa visão que foram desenvolvidas algumas das soluções estruturais encontradas.

- Para que as características de adaptação ao crescimento da criança fossem modeladas de acordo com a altura média dos utilizadores, foram considerados dados antropométricos relativos às idades de 6 e 14 anos. A Figura 18 ilustra os modelos utilizados com base nos dados atrás referidos. [43]

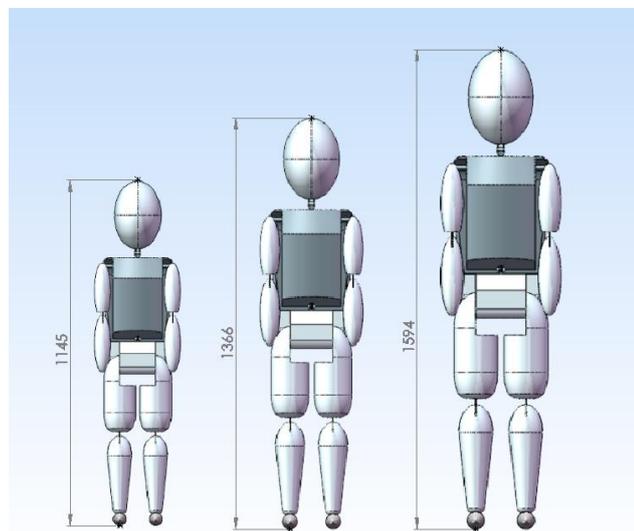



Figura 18 - Modelos com idades de 6, 10 e 14 anos

A modelação da estrutura do *kart* revelou-se um processo bastante iterativo, complexo e criterioso pelo que, no decorrer desta exposição serão apresentados os vários estágios de evolução e salientadas as alterações que estiveram na base dessa evolução.

Para simplificar o processo inventivo, inicialmente foram apenas modelados os componentes periféricos mais críticos no que toca ao respectivo posicionamento e atravancamento. Dessa forma o investimento temporal no desenvolvimento da solução era direcionado para a componente estrutural do projecto.

Estruturalmente, a solução representada pela Figura 20 apresenta uma placa de alumínio AA5083, com 5mm de espessura, com uma segunda estrutura sobreposta, modelada com um perfil oco de secção quadrangular. Nesta fase, foi considerado reforçar esse perfil, com a inserção de um outro no seu interior, mas desta vez de secção circular. O objectivo seria então o de aumentar a rigidez torsional do chassis, recorrendo a perfis híbridos, reforçados e soldados por FSW. A Figura 19 procura ilustrar simplificadamente essa ideia.

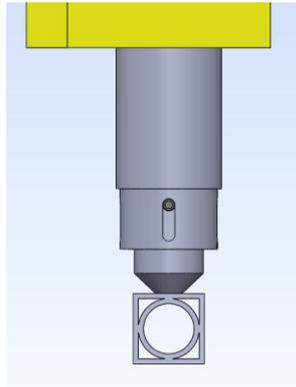



Figura 19 - Perfil híbrido soldado por FSW

Nesta fase ainda não havia sido tomada a decisão final do tipo de bateria a utilizar, pelo que, foram utilizadas as dimensões de uma bateria de chumbo. O motor foi colocado atrás do banco do condutor, para considerar a hipótese de adicionar uma segunda bateria. Dessa forma, a distribuição de peso do *Kart* seria aproximadamente simétrica, aumentando também a sua autonomia. As dimensões do motor foram recolhidas da empresa *Lynch Motor Company* [44], uma vez que era uma das hipóteses a considerar, ainda sem ser conhecido o custo de aquisição associado ao componente em particular. A coluna de direcção ajustável em comprimento foi também introduzida, no entanto o ajustamento angular em relação ao plano horizontal do chassis encontrava-se ainda em desenvolvimento.

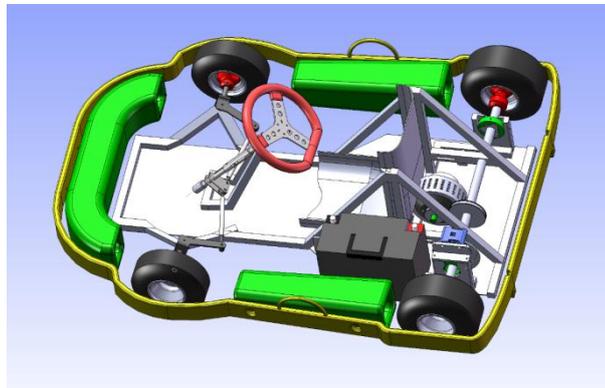



Figura 20 - Primeiro modelo - início do desenvolvimento estrutural

Esta primeira solução foi sujeita a melhorias, principalmente porque fazia uso desnecessário de material em determinadas zonas, e mostrava fragilidades construtivas em componentes críticos como direcção e suporte do eixo traseiro. Além disso, a estrutura sobreposta à placa dificultava a afinação da posição do banco em termos longitudinais e interferia com a posição dos braços do condutor durante a condução.

Na segunda solução, ilustrada pela Figura 21 procurou-se optimizar a quantidade de material utilizado, bem como adicionar elementos funcionais e de segurança. Foi removida a estrutura que se sobrepunha ao chassis, e adicionadas calhas longitudinais para tornar o ajuste da posição do banco mais simples.

Toda a zona de suporte das mangas de eixo foi redesenhada para que fosse possível obter mais robustez, utilizando para isso um bloco de alumínio soldado ao chassis, por forma a desempenhar o papel estrutural de nervura.

Foram também adicionados os pedais ajustáveis longitudinalmente ao tamanho da criança, bem como o ajuste angular da coluna de direcção.

O formato da bateria foi alterado para um possível agrupamento das células de lítio individuais, entretanto escolhidas para recurso energético a utilizar. O motor foi recolocado para uma posição mais conveniente, depois de a bateria ocupar agora o espaço disponível atrás do banco do condutor, para que ficasse protegida de impactos ou detritos projectados durante o rolamento do kart.

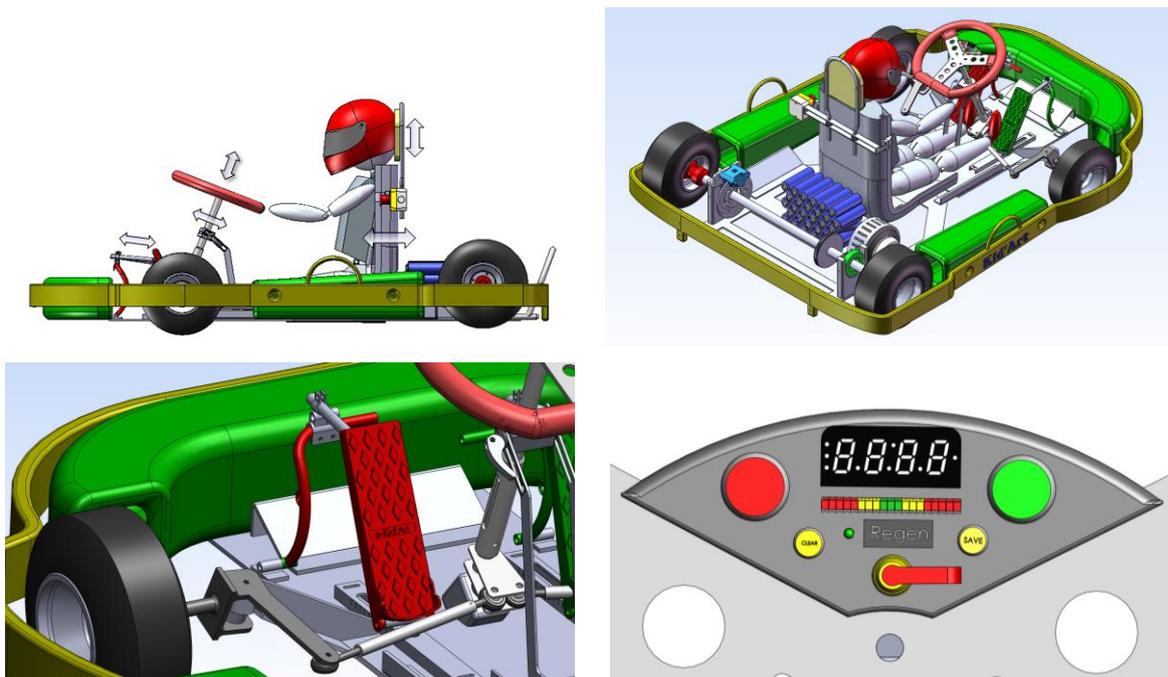



Figura 21 - Segundo modelo - Vista geral e pormenores

Por fim foram ensaiadas as posições de um botão de emergência de corte de energia e do encosto de cabeça.

Para vincar a vertente de pedagógica do *kart*, foi também modelado um pequeno mostrador com diversas funções auxiliares, como exemplo, contagem do tempo por volta, sistema colorido de luzes indicadoras da posição do kart em relação à trajectória ideal da pista, função de gravação de trajectória e de corte de energia.

Esta solução ainda revelava necessidades de melhoramento na fixação do eixo traseiro, bem como na vertente estrutural, por comparação com os chassis comuns utilizados no *Karting*.

Na terceira iteração foi iniciado o desenvolvimento de um novo conceito de optimização de utilização do material. Foi observado que durante a hipotética fase de corte da placa de alumínio de onde resultaria o chassis do *kart*, existiam espaços sub-aproveitados, pelo que, foi ensaiada uma solução de aproveitamento desse material.

Alguns dos componentes do *kart* foram então substituídos por componentes semelhantes, mas que resultariam de operações de corte e quinagem, mantendo as mesmas características funcionais. Podem ver-se alguns exemplos na Figura 22.

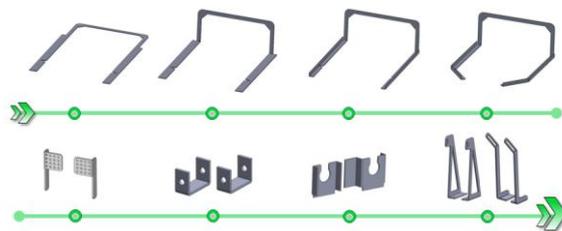



Figura 22 - Sequência de operações de quinagem para vários componentes

Os componentes planos foram depois agrupados por forma a preencher uma área aproximadamente rectangular, resultando na distribuição ilustrada pela Figura 23. O resultado viria a revelar-se interessante na medida em que a maioria dos componentes do *kart* poderia ser obtido através de uma placa de alumínio com menos de 1,5 m^2.

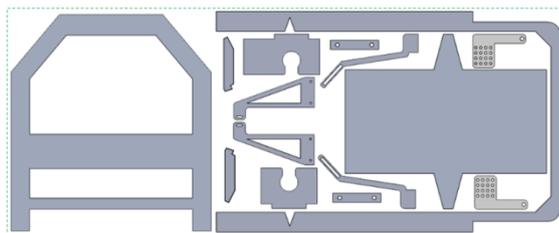



Figura 23 - Placa de alumínio - Distribuição dos componentes a cortar

Na Figura 24 são visíveis exemplos de cordões de soldadura a executar, neste caso para unir as metades frontal e traseira do chassis que serviria de base aos restantes componentes.

Durante esta fase de desenvolvimento, foi disponibilizado um *kart* usual de tamanho de criança para uso académico no âmbito deste projecto. Esta base demonstrativa veio a revelar-se muito produtiva em termos de aprendizagem de conceitos já desenvolvidos e aplicados, melhorando em muitos aspectos a visão construtiva de um veículo deste tipo. Nesse sentido, a terceira iteração sofreu alterações já influenciadas pelo conhecimento acumulado através da observação crítica de alguns dos aspectos construtivos mais pertinentes do *kart* de demonstração.

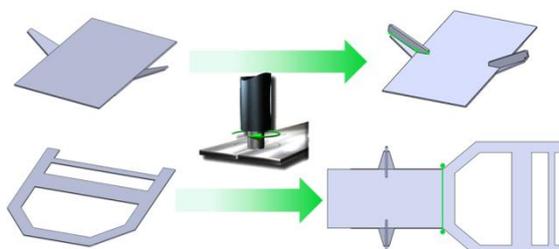



Figura 24 - Operações de soldadura por FSW

Na Figura 25 são já visíveis alguns dos componentes definitivos do *kart* final, tais como a modelação à escala real da bateria de células de lítio e do motor eléctrico entretanto adquiridos, incluindo também o potenciómetro em forma de pedal.

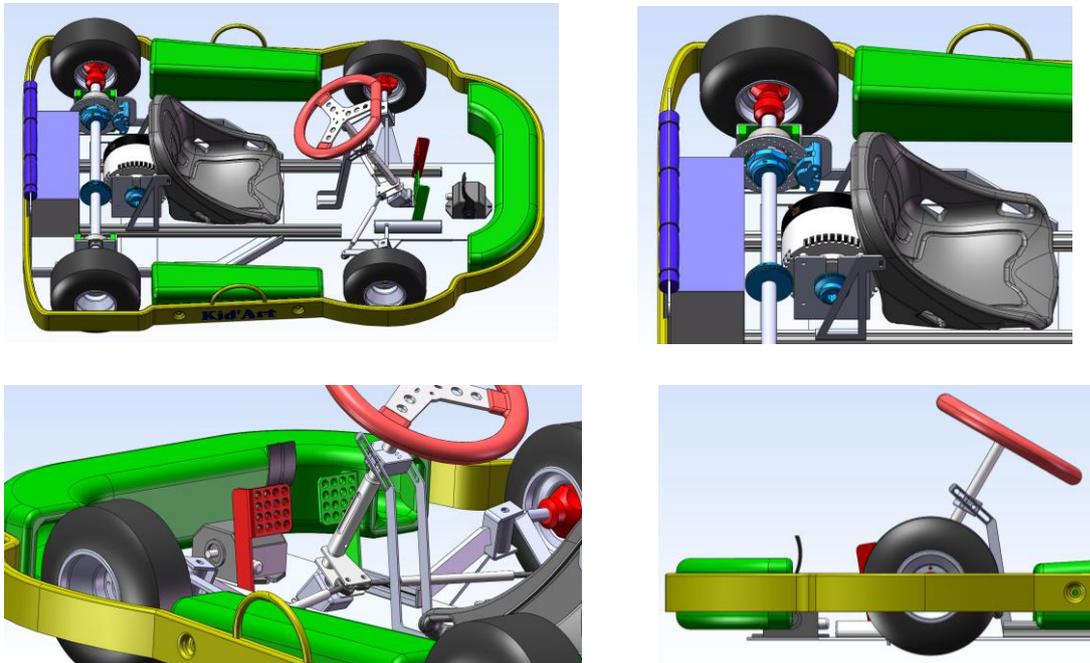



Figura 25 – Terceiro modelo - Vista geral e pormenores

Os pedais da solução anterior foram substituídos por outros resultantes do referido corte optimizado da placa de alumínio, e foi depois ensaiada uma nova solução de ajuste longitudinal para os mesmos.

Para conferir mais robustez no que toca à flexão do chassis na direcção transversal, foram adicionados perfis tubulares na direcção longitudinal, permitindo dessa forma aliar o incremento de resistência à flexão, à possibilidade de ajuste da posição do banco, sendo que o formato deste último apresentava ainda um carácter provisório.

Na zona do eixo traseiro foram redesenhados os suportes das chumaceiras, e da maxila do travão de acção mecânica, tornando essas soluções agora mais eficazes e concretizáveis.

Para tornar esta solução mais próxima de um produto comercializável, era agora necessário atentar em aspectos mais definitivos, como fixação de todos os componentes essenciais e periféricos. Havia também que melhorar alguns aspectos funcionais, visando sempre uma vertente económica contida, por forma a viabilizar comercialmente o produto final.

A quarta e última solução revelou-se a mais completa em todos os aspectos atrás referidos. O problema foi agora abordado com uma visão de carácter mais definitivo, o que resultou nas alterações descritas a seguir.

Um dos elementos que ainda apresentava alguma distância da realidade era o banco do condutor. Nesse sentido, foi alterado para um formato mais próximo, desenvolvido com base no *kart* de criança, e dessa forma todos os suportes poderiam ser ajustados à forma final.

Depois de realizada essa alteração, e tendo por definitivas as dimensões do motor e da bateria, constatou-se que a distância entre-eixos do chassis teria de aumentar para que fosse possível instalar todos os componentes de uma forma adequada e segura. A Figura 26 ilustra a última iteração modelada. [45]

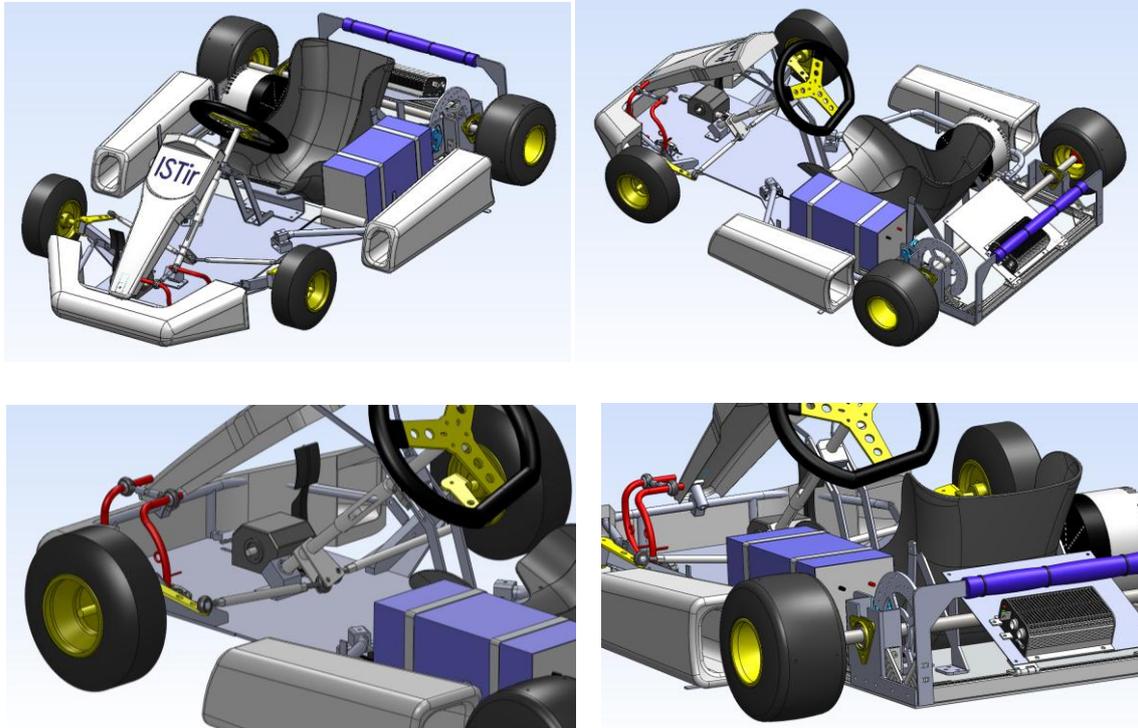



Figura 26 - Quarto e último modelo - Vista geral e pormenores

Nesse sentido, a largura do chassis foi também aumentada para que fosse possível albergar a bateria, ao lado esquerdo do condutor, devidamente protegida.

Para tornar o projecto concretizável em tempo útil, dentro dos recursos disponíveis, estava equacionada a possibilidade de transferência de alguns componentes do *kart* de criança para o novo chassis. De salientar que a componente pedagógica e de lazer não sairiam afectadas com essa decisão.

No entanto, com estas últimas alterações, era necessário garantir que, por exemplo, o veio do kart de criança suportaria os esforços associados ao comportamento do chassis em pista. Essa foi a motivação para o desenvolvimento de uma análise do comportamento dinâmico do *kart,* disponível na secção 3.1.2.

Ainda relativamente aos melhoramentos efectuados, esta iteração incluíra também a placa que portadora do controlador, e dos interruptores de contacto principal e de inversão de sentido de rotação do motor eléctrico.

Foram também explorados e aperfeiçoados os ajustes longitudinais dos pedais, permitindo ajustes rápidos e seguros.

Mantendo o reaproveitamento de componentes, ambos os pedais do kart de criança, esquerdo e direito, foram modelados e instalados, para actuarem o travão mecanicamente, mantendo um deles fixo, e o segundo com a possibilidade de alteração da distância em relação ao primeiro.

O apoio inferior da coluna de direcção foi também redesenhado para poder incluir a rótula presente na extremidade inferior da coluna de direcção.

A segurança foi também melhorada ao desenvolver os suportes necessários aos apoios de todos os parachoques, também modelados consoante as dimensões do *kart* de criança.

Depois de uma análise detalhada dos pormenores construtivos da última iteração, foi verificado que o custo associado a toda a construção se encontrava num nível muito elevado tendo em consideração que o conceito final poderia revelar-se ineficaz ou até limitado a um curto período de vida útil. Fazendo referência às operações de corte e quinagem da placa de alumínio que viria a dar origem a muitos dos componentes estruturais do *kart*, estas teriam de ser requeridas a terceiros. Por outro lado, os blocos de alumínio necessários ao suporte das mangas de eixo, teriam de ser maquinados por CNC requerendo a aquisição de matéria-prima dispendiosa, investimento temporal avultado, e o emprego de equipamentos não disponíveis no Laboratório de Tecnologia Mecânica.

Há ainda a acrescentar, tal como já foi referido anteriormente, que a friction stir welding requer condições estruturais de fixação muito estáveis e robustas aquando da execução de um cordão de soldadura. Esse facto viria também a obrigar ao desenvolvimento de novas estruturas de fixação de componentes (gabaris), na mesa de trabalho do equipamento de FSW disponível, depois de ter sido verificado que os sistemas de fixação standard eram inadequados para esta aplicação em particular. Todo este processo revelar-se-ia complexo e moroso, comprometendo a execução de todo o restante trabalho a desenvolver posteriormente, especificamente, teste de parâmetros de soldadura e execução final dos cordões.

Este estágio do projecto viria a dar origem ao catapultar da abordagem ao problema para uma outra forma de actuação.

Verificado todo este envolvimento, foi contactado o Eng. João Santos, colaborador na empresa Sport Kart, detentor de um vasto conhecimento teórico e prático sobre o *Karting*.

Depois de debatidos o novo conceito estrutural, a tecnologia eléctrica entretanto adquirida, e as circunstâncias temporais e monetárias, foi atingida uma solução consensual, visando prioritariamente a concretização material de conhecimento adquirido. A solução encontrada passaria por considerar a aquisição de uma base estrutural de um *kart* comum, que permitisse o desenvolvimento eléctrico e electrónico previstos, projectando a conversão estrutural para alumínio para um processo faseado.

Desta forma, o risco associado a toda a envoltura seria menor, aumentando as probabilidades de sucesso referentes ao resultado estrutural, garantindo de antemão que o suporte tecnológico eléctrico seria funcional.

Uma base estrutural foi posteriormente adquirida, marcando o início do processo de transformação, implementando-se todos os componentes eléctricos e electrónicos adquiridos.

3.1.2. Análise de Comportamento Dinâmico

Para identificar as solicitações impostas ao veio traseiro do *kart*, constituinte crítico do veículo, serão analisadas três situações distintas isoladamente: a primeira onde o *kart* se desloca em movimento rectilíneo com velocidade constante, a segunda onde o *kart* se encontra em situação de travagem e a terceira onde se analisa uma situação em curva.

Em primeiro lugar, atente-se numa progressão linear a velocidade constante, onde as forças laterais são praticamente inexistentes e portanto, as forças e reacções que se podem identificar são as seguintes[1]:

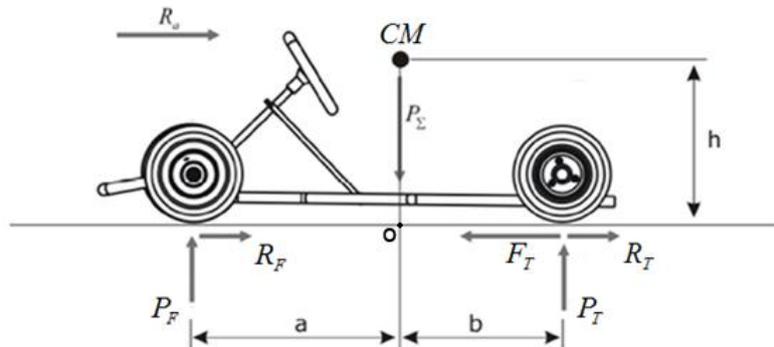



Figura 27 - Identificação de solicitações em progressão linear

Onde:

- $C.M.$ – Centro de massa do conjunto kart e piloto
- P_F – Peso do kart sob as rodas dianteiras
- P_T – Peso do kart sob as rodas traseiras
- P_Σ – Peso total do kart com piloto
- R_a – Força aerodinâmica (de resistência do ar)
- R_F – Força de resistência ao rolamento nas rodas dianteiras
- R_T – Força de resistência ao rolamento nas rodas traseiras
- F_T – Força de tracção nas rodas traseiras
- a, b – Distância entre o $C.M.$ e os eixos frontal e traseiro respectivamente (Nota: valores estimados)
- h –Altura do $C.M.$ em relação ao solo

Considere-se agora a situação de travagem ilustrada pela figura seguinte:

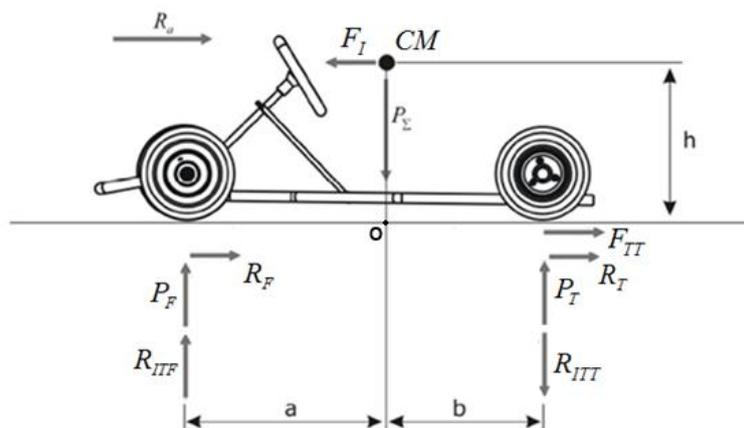



Figura 28 - Identificação de solicitações em travagem

[1] De ora em diante, a nomenclatura F e T procura estar associada às zonas dianteira e traseira do kart, bem como D e E aos lados direito e esquerdo respectivamente.

Onde:

- F_{TT} – Força de travagem nas rodas traseiras
- $F_I(= |F_{TT}|)$ – Força de inércia durante a travagem (aplicada no $C.M.$)
- R_{ITF} – Força de reacção dianteira resultante do momento de inércia de travagem
- R_{ITT} – Força de reacção traseira resultante do momento de inércia de travagem

Notas:

- Neste caso a força de tracção das rodas traseiras é nula ($F_T = 0$)
- Por simplificação, as forças de resistência ao rolamento e de resistência aerodinâmica serão desprezadas em toda a análise subsequente.

Atente-se agora nas forças que actuam no *kart* aquando da descrição de uma curva, à esquerda neste caso, com aceleração nula:

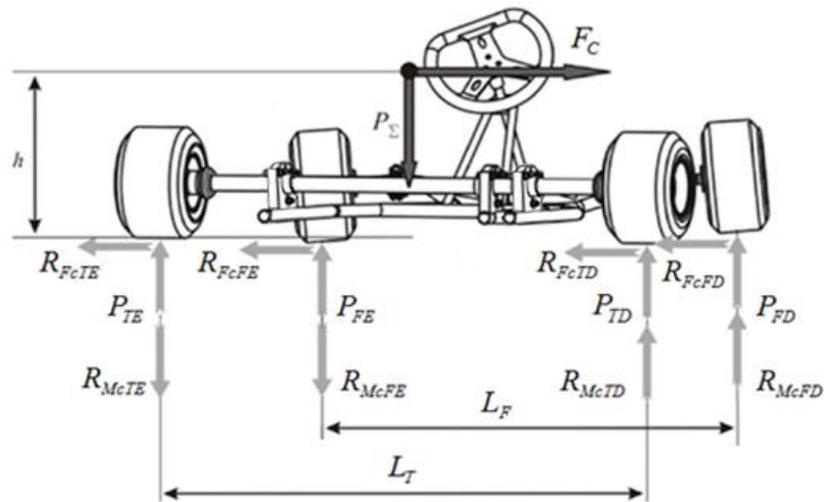



Figura 29 - Identificação de solicitações em curva

Onde:

- F_C – Força centrífuga
- P_{FE}, P_{FD} – Peso do kart nas rodas dianteiras
- P_{TE}, P_{TD} – Peso do kart nas rodas traseiras
- L_T – Comprimento do eixo traseiro
- L_F – Distância entre as rodas dianteiras
- R_{FcFE} , R_{FcFD} , R_{FcTE} , R_{FcTD} – Reacções devidas a F_c, em cada roda
- R_{McE}, R_{McD} – Binário de forças resultante do momento originado por Fc
  - $R_{McE} = R_{McFE} + R_{McTE}$
  - $R_{McD} = R_{McFD} + R_{McTD}$
  - $|R_{McD}| = |R_{McE}|$

Todo o sistema de direcção está repleto de características construtivas, que por sua vez impõem determinados comportamentos ao *kart* durante a sua condução. A conjugação dessas características com a distância entre os pinos da direcção e a sua inclinação, ângulo máximo de direcção, entre

outros aspectos construtivos, promovem um desnível horizontal entre as rodas dianteiras do *kart.* Este facto, uma vez que ocorre muito provavelmente em situação de curva, promove a elevação da roda traseira interior à curva, tal como se pode observar na Figura 30.

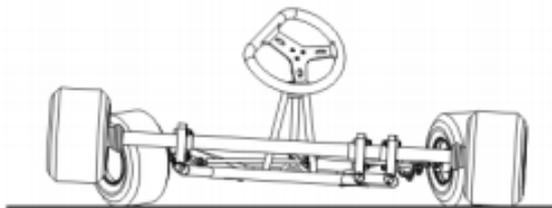



Figura 30 – Elevação da roda traseira interior à curva

Com base nesse fenómeno, o caso mais crítico de solicitação do veio traseiro será o de travagem em curva, situação que se pode observar em seguida:

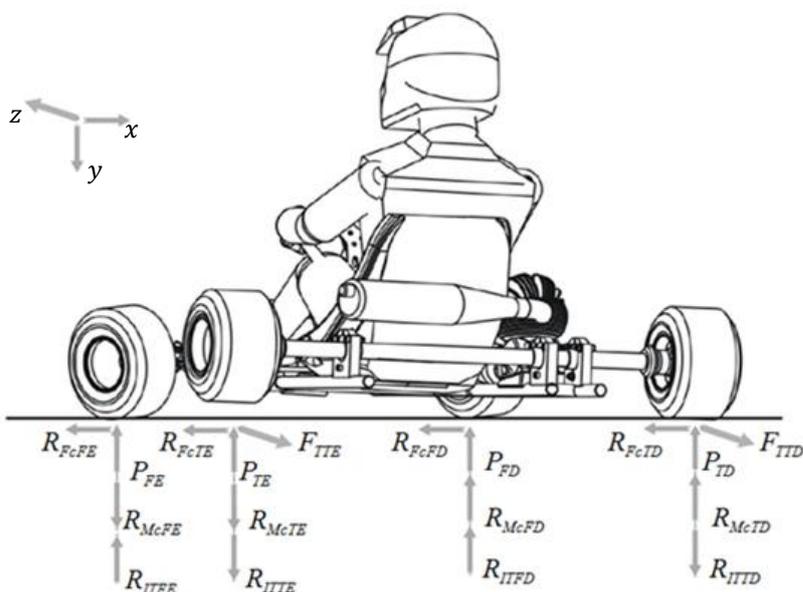



Figura 31 - Identificação de solicitações em curva com travagem

Onde:

- F_{TTE}, F_{TTD} – Força de travagem nas rodas traseiras
- $F_{TT} = F_{TTE} + F_{TTD}$
- $R_{ITF} = R_{ITFE} + R_{ITFD}$
- $R_{ITT} = R_{ITTE} + R_{ITTD}$
- $R_{ITF} = - R_{ITT}$

No anexo A2 é desenvolvido um caso prático de aplicação desta análise, considerando o instante que reune as duas situações mais exigentes, *i.e.*, a situação de travagem aliada à descrição de uma curva.

3.1.3. Selecção da Tecnologia Eléctrica

A procura de uma solução eléctrica foi limitada por diversos factores, quer em termos de recursos financeiros, quer em recursos materiais, principalmente no que toca à disponibilização comercial dos componentes procurados e localização dos fornecedores.

O ponto de partida para a escolha dos componentes a adquirir foi definido em grande medida pelas características do utilizador final. Para isso, foram utilizadas as recomendações para o karting de lazer, feitas pela Federação Portuguesa de Automobilismo e Karting [46]. A Tabela 4 indica as gamas de velocidade e de potência aconselhadas para as respectivas gamas de idade.

Idade	Velocidade Nominal Máxima (km/h)	Potencia (kW)
Desde os 6 anos	<45	<3.5
Desde os 12 anos	<65	≤ 7
Desde os 13 anos	<90	≤ 7
Desde os 15 anos	<110	≤ 21

Tabela 4 – Recomendações para Karting de Lazer FPAK – Potência e Velocidade

Os principais utilizadores deste produto, situar-se-ão entre os 6 e os 14 anos. Assim, os limites de máximos de velocidade e de potência são respectivamente 90km/h e 7kW.

Para reduzir a complexidade do controlo electrónico, a pesquisa centrou-se em motores do tipo DC, para evitar inversores de frequência, e em baterias de lítio, visando aqui comedir o peso do conjunto final.

Relativamente aos motores, no mercado nacional foram encontrados apenas motores de médio e grande porte, afastando-se das reais necessidades do projecto. [47], [48] A procura foi então alargada a países estrangeiros, onde foram encontradas opções mais ajustadas no que toca a características técnicas, por exemplo, na empresa inglesa *Lynch Motor Company* [44]. No entanto, os custos de aquisição verificaram-se demasiado elevados, custos esses mais agravados ainda pelo facto de não incluírem os respectivos componentes de controlo electrónico.

No que toca às baterias, foi encontrado um fornecedor nacional de baterias de lítio, a empresa *Autosil*, no entanto, o custo da aquisição desse componente ultrapassava largamente as expectativas, acabando por se revelar o dobro do preço, do fabricante onde foram finalmente adquiridas.

Durante a fase de pesquisa, decorria o desenvolvimento do projecto Fórmula Student Eléctrico, nas instalações do Instituto Superior Técnico. O projecto é propulsionado por uma equipa de alunos de engenharia das mais variadas áreas, detentores de um vasto conhecimento sobre o tema, e por essa razão, foram recolhidas informações sobre a tecnologia eléctrica utilizada naquele

veículo, junto do grupo de engenharia electrotécnica. Daí resultaram contactos de fornecedores de componentes localizados no mercado chinês. [49], [50]

De entre as opções disponíveis nesses fornecedores, todas se revelaram economicamente viáveis, ao contrário das opções encontradas até então, essas com foco no mercado europeu. Foi então estabelecido um tecto monetário, e direcionada a pesquisa para a escolha de um conjunto funcional e capaz de cumprir com os requisitos do produto final. Foram encontrados diversos conjuntos semelhantes ao ilustrado pela Figura 32, o qual será descrito pormenorizadamente em seguida, uma vez que se revelou ser o mais indicado para a aplicação em vista:

Figura 32 - Kit adquirido com motor e controlador

O kit é composto pelo motor DC de ímanes permanentes com escovas, leitores de tensão e corrente, uma caixa de controlo para testes de bancada, dois potenciómetros com função de acelerador (de pé e de punho), um cabo USB para possibilitar a configuração do controlador, o controlador (específico para motores de corrente contínua), um interruptor principal e um outro inversor de polaridade.

Especificamente, a escolha do motor recaiu sobre um motor de corrente contínua, de ímanes permanentes com escovas, capaz de disponibilizar uma potência contínua de 4.8kW, com um binário nominal de cerca de 13Nm. Este revelou ser o mais adequado dentro dos recursos disponíveis. Para além disso, é electronicamente mais simples, e dispensa dispositivos adicionais. A Tabela 5 indica sumariamente algumas das características mais relevantes, e compara-as a um motor de combustão interna equivalente, utilizado em aplicações de *karting* de lazer:

Motor DC – ref. Mars 0708			Motor Honda 200cc – Gx200	
Voltagem	48	V	-----	
Potência	4,8	kW	4,8	kW
Corrente Contínua	100	A	-----	
Corrente Máx.	300	A	-----	
Eficiência	85	%	N.d.	
Velocidade	3200	RPM	3600	RPM
Binário nominal	13,1	Nm	8~12,4	Nm
Binário de pico	38	Nm	13,2	Nm
Peso	13	kg	16,1	kg
Potência Específica	0,37	kW/kg	0,26	kW/kg

Tabela 5 - Tabela comparativa entre motor eléctrico e motor de combustão interna **[39]**, **[51]**

Existem desde logo características que salientam a potencialidade da aplicação dos motores eléctricos, como é o caso do valor de potência específica (kW/kg).

O controlador incluído (ref.KDZ48401) é programável e garante o controlo suave e seguro deste tipo de motores com escovas. Algumas das características mais valiosas centram-se na componente de segurança, protegendo todo o sistema de excessos de corrente ou tensão. A bateria também é protegida de correntes indesejadas. A sua configuração permite diferentes modos de controlo do motor, tornando assim o veículo final personalizável, podendo dessa forma ser adaptado a cada condutor específicamente. Uma outra característica também disponível e bastante comum em veículos eléctricos é a vertente opcional de travagem regenerativa. Esta opção inverte a polaridade do motor aquando em desaceleração, promovendo o seu funcionamento como gerador, sendo assim possível aproveitar a energia dissipada durante desacelerações e travagens.

O passo seguinte foi o de proceder à escolha da bateria, que estava nesta fase limitada por três aspectos: deveria ser de lítio, a tensão aos seus terminais está estipulada para 48V e a sua capacidade irá resultar de um equilíbrio entre custo, peso e autonomia pretendida.

Em média, os períodos de utilização dos kartódromos rondam os 30 minutos. Esse período revela-se muito exigente fisicamente, sendo por vezes aconselhada a troca de condutor aos 15mins.

Se for tida como referência essa marca temporal, e sabendo de antemão o consumo de 100A do motor em regime de carga máxima, é possível obter uma estimativa simples da capacidade (Ah) necessária da bateria, isto é, cerca de 25Ah.

A empresa escolhida, *China Headway*, disponibiliza várias opções ao cliente. Existem disponíveis baterias com formatos específicos para aplicações em bicicletas, motos e até automóveis, no entanto, existe uma outra opção, personalizável. Nesta última o cliente pode adaptar a bateria às suas necessidades, quer em termos de características eléctricas, quer em relação ao formato desta. Esta opção é possível através da venda de células individuais de bateria de lítio (LiFePO4), com 3.2V cada e 10Ah de capacidade. Por se revelar a mais adequada às necessidades em causa, a opção personalizável foi a selecionada.

Para que a escolha fosse coerente com o projecto aqui em desenvolvimento, era de todo o interesse que o formato final da bateria permitisse manter um baixo centro de gravidade. Além dessa questão construtiva, era absolutamente necessário que o pack final incluísse o sistema de monotorização das células, o já referido BMS. Estes dois aspectos foram comunicados ao fornecedor, pelo que, a bateria terminou com as características indicadas na Tabela 6:

Característica	Célula	Conjunto final
Capacidade	10Ah	20Ah
Tensão	3,2V	48V
Tensão de carregamento	3,65V	58.4±0.05V
Tensão de descarga cut-off	2,0V	32V
Corrente máx. de descarga	150A	100A
Corrente máx. de carga	60A	20A
Peso	307g	12kg
Densidade de energia	105Wh/kg	
Densidade de potência	850W/kg	

Tabela 6 – Características da célula de lítio individual, e da bateria final

A configuração final é composta por 30 células individuais. Quinze dessas células estão ligadas em série para se atingir os 48V aos seus terminais, constituindo um andar. Em paralelo existem dois desses andares para aumentar a capacidade do conjunto final de 10Ah para 20Ah, dessa forma próximo dos 25Ah estimados. Esta ligeira redução de capacidade terá implicações na autonomia do veículo. Era possível aumentar essa capacidade recorrendo a um aumento do número de células, neste caso, 15 novas células, e progredindo no número de ligações em paralelo. No entanto, a condicionante do peso e custo limitaram essa possibilidade. Desta forma, a autonomia prevista para um regime constante de 100A fornecidos ao motor será de 12 minutos. A Figura 33 ilustra o aspecto final do interior de uma bateria construída pelo mesmo fornecedor. A necessidade de adquirir um carregador era incontornável, e portanto, foi também adquirido um junto do fabricante da bateria. Esse componente carrega a bateria a uma carga constante de 15A.

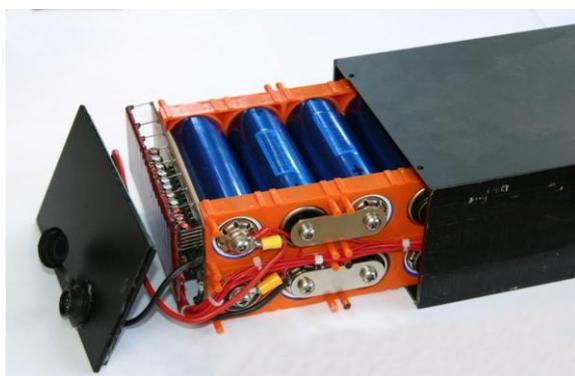



Figura 33 - Aspecto do interior de uma bateria do fornecedor

Devido ao facto de as baterias constituírem uma forte ameaça poluente do meio ambiente, o processo de aquisição da bateria envolveu burocracia relacionada com a gestão do ciclo de vida

desta. Para que fosse possível importar a bateria, houve a necessidade de submeter essa gestão a uma entidade competente, de acordo com o previsto no nº2 do artigo 23º do Decreto-lei 6/2009. Era possível optar por uma de duas opções, a Agência Portuguesa do Ambiente, ou em alternativa, a empresa *Ecopilhas*. No primeiro caso, o importador deveria demonstrar cumprir com as obrigações previstas para o sistema integrado de reciclagem, ao passo que no segundo caso, essa responsabilidade é transferida para a empresa mencionada, ficando essa responsável pela gestão integral do ciclo de vida das pilhas importadas. A opção recaiu sobre a empresa *Ecopilhas*, que reconheceu mediante contrato, que o Instituto de Engenharia Mecânica IDMEC cumpria com as obrigações decorrentes no Decreto-lei nº6/2009 de 6 de Janeiro, no que respeita ao Registo de Produtores de Pilhas e Acumuladores, através do registo nessa entidade, tendo sido atribuído o número de Produtor ECO121/2011.

3.2. Fases de Desenvolvimento

3.2.1. Plataforma Eléctrica

Após a recepção dos componentes eléctricos e electrónicos foi dado início ao processo de verificação do seu estado, e consequentemente montagem dos mesmos.

Era portanto necessário montar uma bancada de testes, a qual foi iniciada com o fabrico do suporte do motor eléctrico, entretanto modelado em SolidWorks®, juntamente com o motor. Foram depois utilizados os equipamentos disponíveis no Laboratório de Tecnologia Mecânica para fabricar o suporte pretendido. A sequência de imagens da Figura 34 procura ilustrar simplificadamente todas as fases desse processo.

Figura 34 – Fases da construção do suporte do motor eléctrico: modelação, desenho 2D e traçagem, fresagem, quinagem e montagem final.

O controlador havia que ser configurado para que se tornassem perceptíveis as capacidades do respectivo software, bem como garantir a segurança dos testes de bancada. Para isso, era necessário alimentar o controlador com uma fonte DC de 18V. Para isso foi utilizado um transformador usado, oriundo de uma impressora, e foi efectuada uma ligação teste. Durante esse teste foi monitorizada a corrente entregue ao controlador e havendo sido verificado que esta era superior ao limite de 150mA indicado nas especificações técnicas, o teste foi interrompido. Para limitar a corrente foi então necessário testar diversos valores de resistências, e por fim utilizar uma resistência de carvão de 20 Ohm, colocada no circuito na posição indicada na Figura 35. Para auxiliar esta montagem, foram também construídos os cabos com os terminais adequados, utilizando

brasagem. Depois de feita a correcta montagem dos elementos, foi possível aceder ao menu de configuração do controlador.

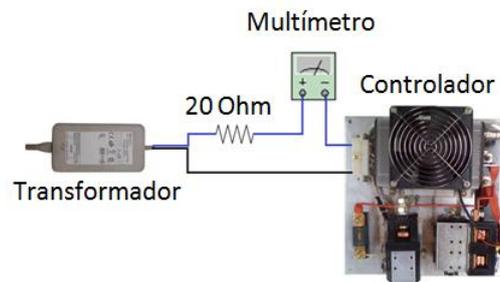



Figura 35 - Montagem necessária à configuração do controlador

A configuração do controlador era até então a configuração standard, que foi então alterada para uma mais conveniente aos ensaios futuros, nomeadamente, a título de exemplo:

- A corrente máxima entregue ao motor foi limitada a 80A
- Foi indicado que seria utilizada a caixa para testes de bancada (ao invés de um dos potenciómetros)
- Foi estabelecido que o limite mínimo da tensão aos terminais da bateria seria de 35V (para que o sistema interrompesse o seu funcionamento antes do BMS)
- A opção de regeneração de energia foi desactivada para que os testes iniciais de carga e descarga fossem efectuados em condições normais, simplificadas e o mais seguras possível.

Como os valores de corrente praticados são elevados, existe a necessidade de acautelar a temperatura de funcionamento de alguns componentes do sistema. Os cabos eléctricos que estabelecem a ligação entre o controlador e o motor são um exemplo disso. Para evitar danos causados pelo seu sobreaquecimento, foi consultada uma tabela normalizada de condutores eléctricos, onde era indicada a corrente máxima aconselhada, para uma determinada área de secção. O valor encontrado foi de $25mm^2$, para um cabo de cobre revestido a pvc, exposto ao ar ambiente, com uma corrente máxima de 126A. Os cabos adquiridos seguiram essas especificações. [52]

Como referido, no primeiro ensaio foi utilizada a caixa de testes de bancada, que permitiria ligar e desligar o conjunto, acelerar, travar e inverter a rotação do motor. Acontece porém que durante a verificação da correcta posição dos contactos na ficha do controlador, verificou-se que a informação de output do controlador que constava no manual, não correspondia à numeração indicada fisicamente junto da ficha. Este aspecto revelou-se de morosa resolução, uma vez que, a verificar-se que a ordem dos contactos não era a correcta, poderiam surgir problemas indesejáveis que afectassem o bom funcionamento do controlador. O seu esclarecimento era portanto imprescindível. Depois de efectuar engenharia inversa, e de recorrer ao contacto com o fornecedor, constatou-se que se travava de uma forma de encriptação. Com toda a informação reunida foram efectuadas todas as ligações correctamente caminhando assim para a realização segura do primeiro ensaio da maioria dos componentes.

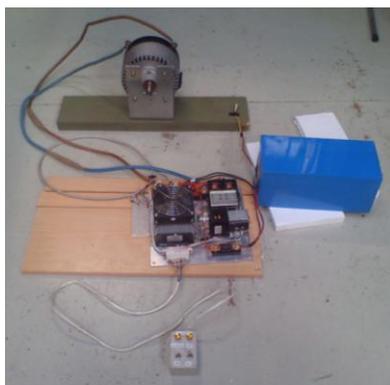



Figura 36 - Montagem experimental do primeiro ensaio

Neste estágio de preparação do primeiro ensaio, era por fim necessário verificar a tensão aos terminais da bateria, verificação que viria a devolver uma tensão superior aos 48V inicialmente previstos, correspondentes à diferença de potencial exigida aos terminais do motor. Esse facto não se revela gravoso se a diferença registada não for além dos 10% ou 15%. Nesse sentido, uma vez que os valores medidos se encontravam dentro desses limites, a primeira montagem foi concluída e testada com sucesso, tomando o aspecto da Figura 36.

Visando uma vertente demonstrativa de todo o equipamento já adquirido, foi construída uma maquete, com uma montagem mais evoluída em relação à primeira. As diferenças estão principalmente na remoção da caixa de controlo de testes de bancada, e consequente implementação do potenciómetro na forma de pedal Foram também instalados novos interruptores de alimentação e inversão do sentido de rotação do motor, entretanto adquiridos.

Foi também construído um pequeno display para concentrar as informações luminosas em LED no que respeita a luzes de indicação de correcto funcionamento do sistema, códigos de erro do controlador ou de função de regeneração em funcionamento.

Para complementar essa informação, foram também incluídos os mostradores de tensão e corrente, montados num pequeno suporte de alumínio, também construído nas instalações do Laboratório de Tecnologia Mecânica. A Figura 37 procura ilustrar o aspecto final da maquete funcional de demonstração da componente eléctrica e electrónica do kart.

Figura 37 - Aspecto final da maquete funcional de demonstração do sistema eléctrico

Para testar o bom funcionamento de todos os componentes na nova configuração, foram efectuados diversos testes de accionamento do motor, todos com sucesso.

Os resultados apurados permitiram uma calibração mais pormenorizada da sensibilidade do pedal acelerador.

Estando o correcto funcionamento assegurado, seguiam-se as fases de implementação e testes reais. Tal como foi anteriormente referido, foi adquirida uma base estrutural de um *kart* comum, a qual se encontrava localizada no Kartódromo de Fátima. A figura seguinte ilustra o estado inicial do *kart* adquirido, colocado sobre uma bancada de trabalho específica, disponibilizada por alguns dias, no local:

Figura 38 – Estado inicial do *kart* adquirido nas instalações do Kartódromo de Fátima

Procedeu-se faseadamente à construção de suportes para acomodar os componentes bateria, motor e controlador, sempre por forma a garantir localizações o mais seguras possível, protegidas de elementos externos.

Um dos cuidados durante este desenvolvimento, foi o facto de se acautelar a propagação de vibrações resultantes da permanência em pista para os elementos mais sensíveis da instalação eléctrica, especificamente controlador e bateria.

Instalados os componentes, todas as ligações foram feitas de forma segura, até que por fim, o *kart* foi levado para a pista, onde foram recolhidas algumas fotografias, momentos antes de se efectuarem os testes reais. A Figura 39 a), b) e c) ilustra esse momento:

a)

b)

c)

Figura 39 - Aspecto do *kart* adquirido com os componentes eléctricos e electrónicos instalados

O teste em pista decorreu sem qualquer registo de anormalidades. Foram testados ambos os sentidos de rotação do motor, e foi possível iniciar a marcha nos dois casos, a partir de velocidade nula. A velocidade máxima está limitada a cerca de 70km/h, uma vez que está dependente da rotação máxima do motor e da relação de transmissão utilizada.

3.2.2. Desenvolvimento de Caraterísticas Ajustáveis

No que toca às características ajustáveis do *kart*, foram concebidos, construídos e aplicados os sistemas de ajuste da posição longitudinal dos pedais.

Para o pedal do acelerador (potenciómetro) foi construído, a partir de uma placa espessa de alumínio um sistema de ajuste rápido. Para isso foram utilizados duas cames de aperto rápido, tipicamente utilizadas em bicicletas. A **Figura 40** ilustra o processo de desenvolvimento desde sistema:

Figura 40 - Sistema de ajuste do acelerador

Por sua vez, o sistema do ajuste do pedal do travão foi concebido, desta feita tendo em conta o aproveitamento do pedal original do acelerador. Uma vez que o sistema de travagem é crítico durante a utilização regular de um *kart*, foi desenvolvido um sistema de ajuste que, embora requerendo mais tempo para o operar, diminui a possibilidade de falha do sistema, quando comparado com outras opções de ajuste rápido. A Figura 41 ilustra as fases de desenvolvimento deste sistema de ajuste.

Figura 41 - Sistema de ajuste do pedal do travão

Em relação aos componentes da plataforma eléctrica, o suporte do motor foi construído em aço uma vez que se trata de um componente sujeito a cargas dinâmicas muito exigentes. A Figura 42 ilustra as fases de desenvolvimento deste componente.

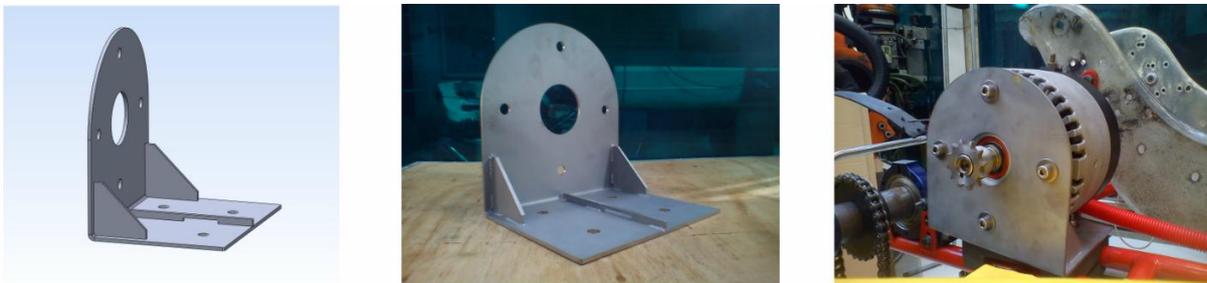



Figura 42 - Suporte do motor eléctrico

A localização final da bateria também exigia a construção de um novo suporte. Foi escolhido o lado esquerdo do *kart* para estudar a aplicação desse suporte. Depois de analisadas várias opções, foi atingida uma solução exequível que daria resposta às necessidades da fixação deste componente em particular. Foram tidos em conta aspectos como distribuição de peso e protecção contra elementos externos (projecção de detritos). A Figura 43 ilustra as fases de desenvolvimento deste suporte.

Figura 43 - Suporte da bateria

Por último, era necessário construir o suporte do controlador. O espaço disponível no *kart* para fixar este componente já era algo limitado, e por essa razão o desenvolvimento revelou-se mais complexo. O local escolhido para a fixação deste componente foi a zona traseira do banco. Desta

forma os componentes ficam protegidos dos detritos exteriores. A Figura 44 ilustra as fases do desenvolvimento do suporte.

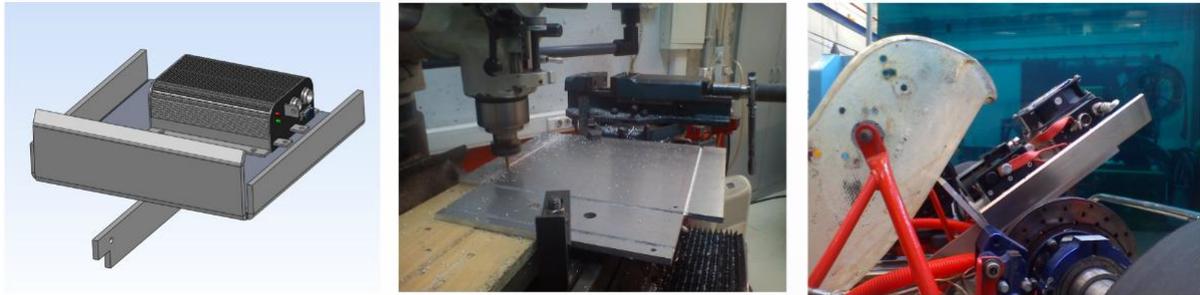



Figura 44 - Suporte do Controlador

A sua forma viria a exigir uma operação de soldadura, neste caso em T. O processo de soldadura por FSW, escolhido para esta aplicação, exige uma estrutura de posicionamento e fixação dos componentes a soldar que tenha capacidade de responder às exigências da execução de um cordão deste tipo. Essa estrutura foi desenvolvida e o cordão foi efectuado, tal como é ilustrado na Figura 45.

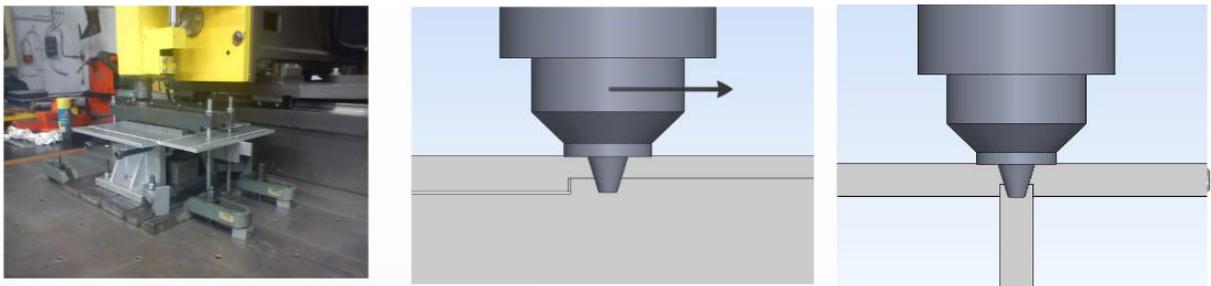



Figura 45 - Desenvolvimento de cordão de soldadura por FSW.

Com base nesta ilustração pode ver-se o aspecto da montagem, do shoulder e pino utilizados, sendo que o último incluía estrias helicoidais. Para reduzir a necessidade de penetração da ferramenta, e para evitar a utilização de uma ferramenta esbelta, foi maquinada uma caixa na placa horizontal com uma altura de 3mm, sendo que o pino utilizado tinha 8 mm de altura. A tabela seguinte resume os parâmetros da execução do cordão de soldadura:

Material: AA5083-H111, 8mm	
Penetração	8,2 mm
Carga Axial	1300 Kg
RPM	800 r.p.m.
Tempo de Espera	4,0 s
Velocidade de Mergulho (Entrada)	0,1 mm/s
Velocidade de Avanço	10cm/min

Tabela 7- Parâmetros de Soldadura

O aspecto final do componente, soldado e quinado, encontra-se ilustrado pela Figura 46.

Figura 46 - Aspecto final do suporte do controlador

Posteriormente foram efectuada a verificação do cordão de soldadura através de técnicas de ensaios não destrutivos. Durante esses ensaios não foram encontrados defeitos ao longo do comprimento do cordão.

Relativamente à coluna de direcção, os ajustes previstos foram repensados. Com base em todo o conhecimento adquirido sobre estes veículos, constatou-se que este componente poderá estar sujeito a esforços muito intensos se a sua utilização em pista for muito explorada. Por essa razão, não foi incluído o ajuste da coluna em comprimento.

Por seu lado, o ajuste angular está disponível, mas apenas em duas posições distintas. Especificamente o ajuste possível encontra-se entre 41º na posição inferior, e 46,5º na posição superior, é feito com uma ligação roscada e necessita de ferramentas auxiliares para efectuar a mudança. Os ângulos referidos são medidos entre o eixo da coluna e o plano horizontal do chassis. As diferenças entre essas duas posições podem ser observadas na Figura 47.

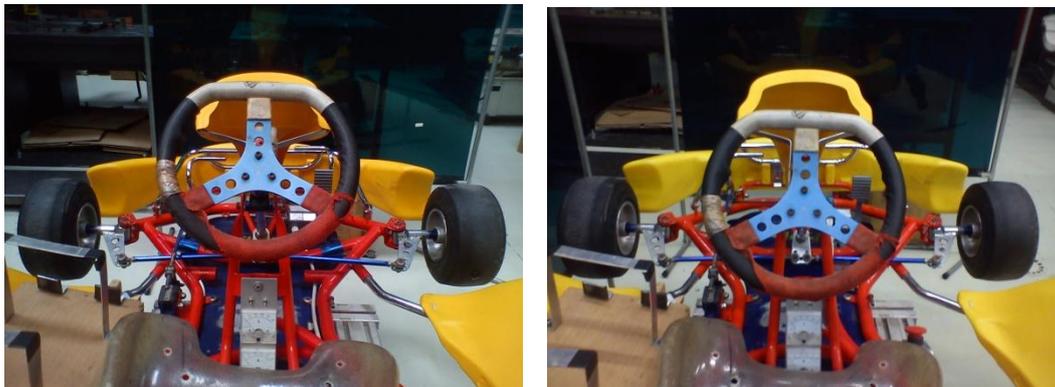



Figura 47 - Posições Superior e Inferior de Ajuste da Coluna de Direcção

4. Motorização e Controlo

O facto de a propulsão do kart envolver tecnologia eléctrica, abre desde logo caminho a novos rumos no controlo de veículos deste tipo. Neste exemplo é possível aceder ao software do controlador, por forma a atribuir configurações ajustadas às mais diversas ocasiões. A Figura 48 ilustra duas janelas de configuração disponíveis no controlador, onde se podem observar algumas das opções de controlo:

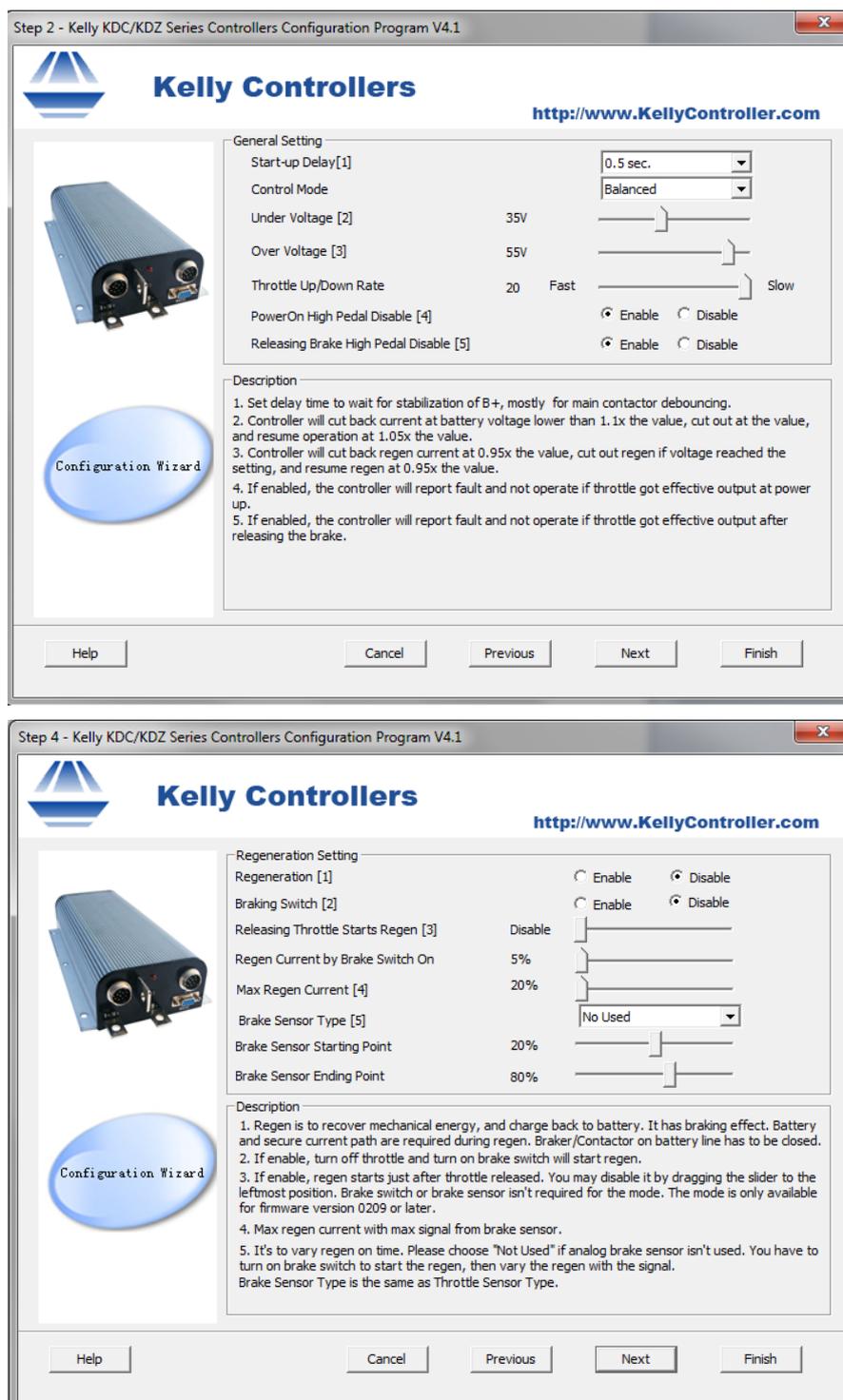



Figura 48 - Exemplos de janelas de configuração de controlo

Com base nesta ilustração, é possível observar algumas características de controlo, nomeadamente relacionadas com sobre e sub voltagens da bateria, sensibilidade do potenciómetro (pedal acelerador). Numa outra etapa, as opções relacionadas com a regeneração de energia durante a travagem ou desaceleração, nomeadamente o modo de início de regeneração, limite de corrente entregue à bateria e configuração de um possível sensor implementado no pedal do travão.

A configuração utilizada para testes em pista, foi regida por uma estratégia de segurança, muito semelhante à configuração dos testes de bancada. As principais diferenças entre as duas configurações centram-se na actualização do accionamento da função de aceleração para o potenciómetro na forma de pedal, e ajuste da sensibilidade do mesmo. Também foi melhorada a configuração das opções relacionadas com a inversão do sentido de marcha, como limite de corrente entregue nessa situação, e reacção do controlador ao accionamento inesperado do respectivo comutador.

Existe uma outra opção disponível no âmbito do controlo que não está neste momento activada, mas que será de todo conveniente fazê-lo numa outra fase do projecto, que se prende com o controlo de temperatura dos componentes. É por isso possível interromper o funcionamento do motor e do controlador aquando da verificação de um excesso de temperatura.

Para que o utilizador consiga monitorizar os valores de tensão e corrente durante a utilização do kart, foram instalados dois mostradores dedicados a cada um desses valores. A Figura 49 ilustra o aspecto da sua disposição, antes e depois da montagem.

Figura 49 - Mostradores com indicação de Tensão e Corrente

Estes mostradores revelaram-se muito úteis para uma monitorização adequada do estado de carregamento da bateria e da carga entregue ao motor. No entanto, a sua construção é muito sensível a perturbações físicas o que perturba a leitura dos mesmos aquando sujeitos às vibrações e forças G impostas no chassis durante a execução da pista.

Na Figura 49 também é possível observar a posição do botão de emergência, no canto inferior direito no banco. A fixação do botão ainda se encontra em testes, para averiguar a probabilidade de accionamento involuntário. Caso se verifique com regularidade, será deslocado para a proximidade, mantendo a mesma facilidade, e desimpedimento no acesso.

- Bateria – Aspectos funcionais

A bateria de lítio adquirida tem um modo de funcionamento que poderá não ser evidente numa primeira observação, e é por isso conveniente esclarecer alguns aspectos com ele relacionados, para evitar utilizações danosas.

A Figura 50 ilustra o andamento dos valores de tensão e corrente de um ciclo de carga e descarga a 1C de uma célula individual de lítio de 3,2V e 10Ah, constituinte da bateria adquirida.

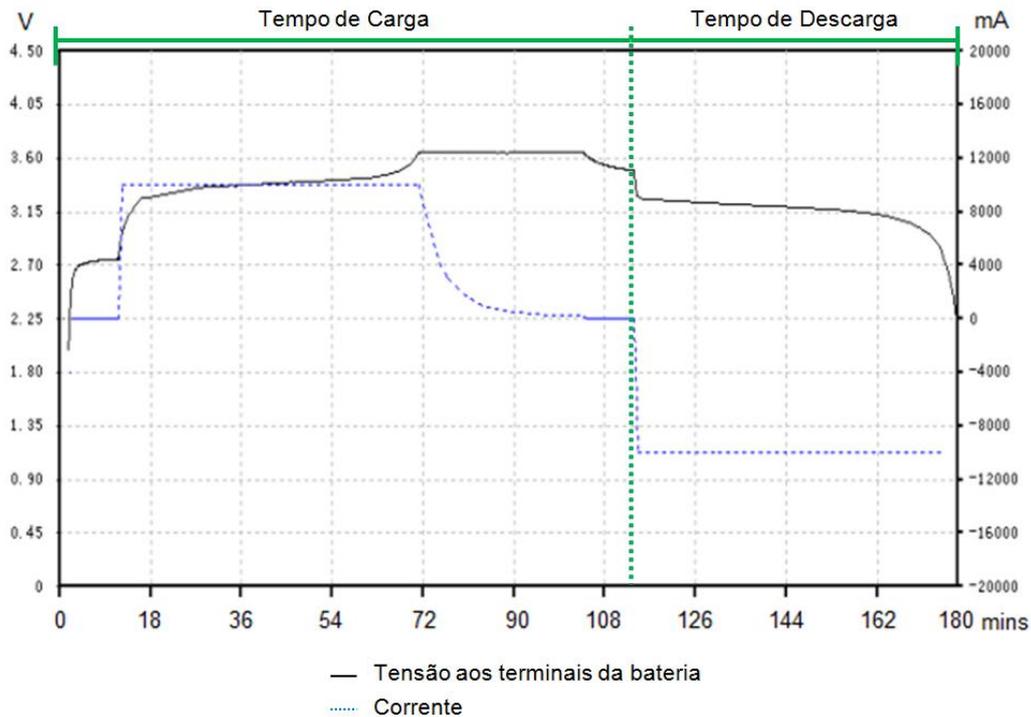



Figura 50 - Andamento da corrente e tensão durante um ciclo de carga e descarga CC/CV realizado a 1C de uma célula individual de 3,2V e 10Ah

A melhor forma de carregar uma bateria deste tipo é utilizar um ciclo CC/CV, ilustrado na figura anterior, que significa corrente constante e tensão constante ao longo desse período de carregamento. De uma forma mais explícita, existem quatro intervalos temporais presentes num ciclo, e são eles, uma primeira fase onde a bateria descarregada necessita de uma corrente constante muito reduzida para recuperar a tensão aos seus terminais para o seu valor nominal. Ultrapassada essa fase, pode ser utilizada uma grande corrente de carga, neste caso, 10A.

O estágio de corrente constante é o mais importante durante o período de carregamento, uma vez que permite o carregamento desde 5% de SOC até cerca de 90%. Depois desta fase, entra-se num período de tensão constante, onde uma pequena corrente é imposta às baterias até que estas se encontrem totalmente carregadas. Desta forma termina o carregamento, garantindo que todas as células do conjunto que perfaz a bateria se encontram todas com a mesma % SOC.

O período de descarga, realizado a uma corrente constante de 10A, pode verificar-se próximo do período estimado, que nestas condições rondaria os 60 minutos.

O objectivo destes ciclos de carga e descarga é assegurar que todas as células actuem de forma semelhante entre si, garantindo que a performance da bateria se mantém equilibrada.

O tempo de vida útil indicado pelo fabricante ronda os 2000 ciclos. Durante esse período de utilização, será de esperar uma ligeira perda de performance da bateria.

Para averiguar essa degradação são em seguida apresentados dois gráficos que demonstram esse andamento, para células do mesmo tipo químico, não correspondendo noutras características às células adquiridas:

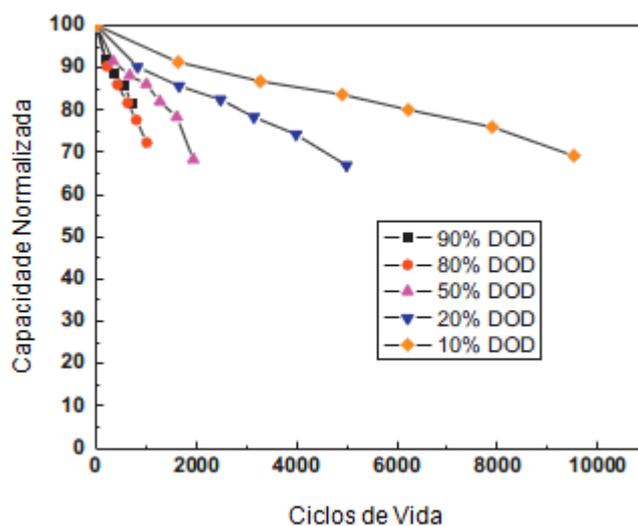



Figura 51 – Degradação da capacidade da bateria em função dos ciclos de vida

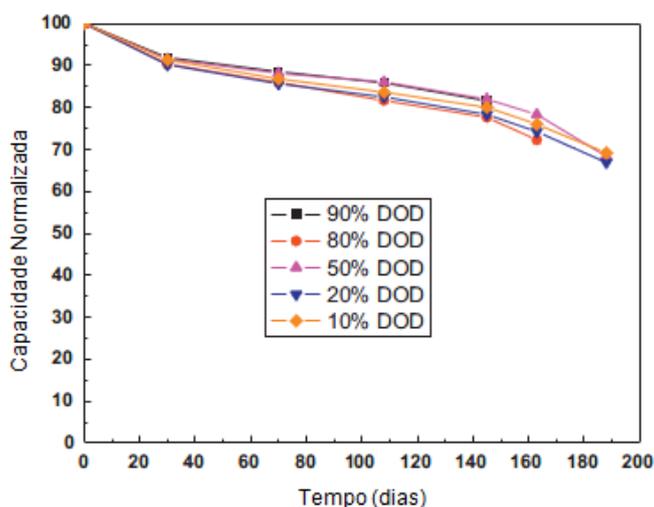



Figura 52 - Degradação da capacidade da bateria em função do tempo

Os gráficos acima pretendem ilustrar, que as profundidades de descarga aparentam ter um efeito negativo na perda de capacidade da bateria, visível na Figura 51. No entanto, se a informação for disponibilizada em função do tempo decorrido ao longo dos ciclos, ver Figura 52, é possível observar que esse tempo decorrido tem mais impacto na perda de capacidade, se for comparado com a degradação de capacidade da bateria a diferentes DODs. Na situação exposta, os ciclos de carga e descarga foram efectuados a uma taxa de C/2. Tratando-se de células de 2Ah, o valor correspondente de carga e descarga é de 1A. [53]

5. Relatório de Custos

Tratando-se do desenvolvimento de um único veículo em fase conceptual, todos os custos associados à sua realização vêm inflaccionados, uma vez que não são aplicados descontos de quantidade, nem quaisquer outros benefícios semelhantes. É portanto espectável que o custo final do protótipo construído se afaste negativamente de um hipotético preço de venda ao público. A tabela seguinte resume os custos associados à aquisição do sistema eléctrico do kart, não pretendendo assemelhar-se a um plano de negócio.

Equipamento	Valor monetário (Euros)	I.V.A. 23% (Euros)
Kelly Controls – Motor	822,08	---
China Headway – Bateria e Carregador	464,35	---
Portes Motor	187,46	---
Portes Bateria	146,67	---
Outras Despesas		
Despesas Bancárias – Motor	39,05	4,23
Despesas Bancárias – Bateria	39,05	4,23
Despesas Alfandegárias – Motor	361,40	13,80
Despesas Alfandegárias – Bateria	218,79	11,50
Legalização de Importação de Baterias	25,00	5,75
Despesas de Entrega CTT	5,18	1,19
Total	**2309,03**	**40,70**

Tabela 8- Resumo dos custos de aquisição do equipamento eléctrico

Todo o equipamento adquirido requeria preparação prévia antes das montagens para os ensaios preliminares. Em causa está a construção cuidada de fichas por processos de brasagem, necessárias à correcta instrumentação da montagem final, instalação de interruptores para eliminar a caixa destinada a testes de bancada, construção do painel de controlo que reúne códigos de cor, entre outros elementos. Toda esta preparação envolveu a aquisição de equipamento e material consumível, cujo total deverá rondar os 150 Euros. Este valor não será considerado no custo final, uma vez que se trata de equipamento polivalente, e onde o custo dos materiais consumíveis não é relevante em relação ao montante final.

A instalação eléctrica foi posteriormente implementada numa base cujos custos estão indicados na tabela a seguir, em euros, onde são comparados com a aquisição de um kart de lazer disponível comercialmente, o modelo *Dino Leisure Gx200*, com o mesmo nível de potência do protótipo eléctrico desenvolvido, cerca de 4,8kW. [55]

Modelo	Custo de aquisição S/I.V.A.	Equipamento Adicional	Total S/I.V.A.	Total C/I.V.A.
Dino Leisure Kart Gx200	2654,00	---	2654,00	3264,42
Kart Eléctrico - Protótipo	450,00	2309,03	2759,03	3393,61

Tabela 9 - Resumo dos custos de aquisição de produtos concorrentes

A fonte energética utilizada por cada um dos veículos é distinta e por isso, é feita em seguida uma breve abordagem aos consumos, e custos associados, de cada um dos veículos. Para isso foi considerada uma base temporal de uma hora de utilização, período no qual os veículos requerem a potência máxima disponível dos respectivos motores. [56], [57]

Tipo de Kart	Combustão Interna	Eléctrico
Potência utilizada	4,8 kW	4,8 kW
Consumo por hora	2 litros de S/Ch95	9,33 kWh
Custo da energia	1,71 Eur/litro	0,15 Eur/kWh
Custo por hora	3,42 Eur	1,40 Eur
Custo adimensional	2,44	1

Tabela 10 - Resumo dos custos dos consumos energéticos

Pode então afirmar-se que é de facto uma tecnologia mais viável numa vertente económica, apesar de revelar ainda algumas fragilidades no que toca às autonomias praticadas e do consequente período de interrupção para reposição de recursos energéticos.

Esta é no entanto uma tecnologia com um grande foco de desenvolvimento actual, pelo que, os novos avanços trarão certamente melhorias nos aspectos atrás referidos, colocando os veículos eléctricos num patamar muito competitivo em relação às opções equivalentes de combustão interna.

6. Conclusões e Trabalho Futuro

6.1. Conclusões

O desenvolvimento prático conseguido ao longo deste projecto veio a revelar-se numa primeira etapa de um processo de conversão estrutural.

A adaptação do veículo ao crescimento da criança foi colocada em prática. Foram concebidos, construídos e aplicados os sistemas de ajuste dos pedais do travão e acelerador.

Com base numa extensa pesquisa sobre as várias opções de motorização disponíveis, bem como sobre componentes de armazenamento de energia e gestão electrónica, foi seleccionada, adquirida, testada e implementada uma plataforma eléctrica funcional.

Foram efectuados testes de bancada, com várias configurações electrónicas. Depois de averiguadas as condições de segurança e de funcionalidade de todos os componentes, foram também efectuados testes em condições reais, em pista.

Foram concebidos, construídos e aplicados todos os suportes necessários à instalação dos componentes da plataforma eléctrica, especificamente para o motor, bateria e controlador. Para o fabrico deste último foram utilizadas técnicas avançadas de fabrico, nomeadamente, recorrendo ao processo de soldadura por FSW.

Foi desenvolvido um sistema de fixação adaptado às características das peças a soldar, neste caso, para executar um cordão de soldadura com geometria em T das placas a soldar.

O cordão foi efectuado e foram posteriormente utilizadas técnicas de ensaios não destrutivos para averiguar a sua integridade. Não foram encontrados defeitos.

Um novo conceito estrutural foi desenvolvido computacionalmente de forma iterativa, confluindo numa solução construtiva inovadora, uma vez que a maioria dos componentes estruturais é obtida através de uma placa de alumínio AA5083-H111, com 5 mm de espessura, e com uma área inferior a 1,5 m^2. Desta forma é optimizado o aproveitamento de material, aliado a uma redução significativa do peso do conjunto final, cerca de 40kg.

A solução estrutural obtida requer no entanto sistemas de fixação específicos e robustos aquando da execução dos cordões de soldadura. Garantir a posição entre componentes a soldar, oferecendo simultaneamente um suporte físico capaz de lidar com as cargas exercidas durante a execução dos cordões é absolutamente crucial. O projecto e construção desses gabaris teria de ser adaptado às características da estrutura e do equipamento disponível no Laboratório de Tecnologia Mecânica. Este tipo de projecto revela-se moroso e complexo, por experiência, razões que levaram à suspensão da sua concretização prática nesta fase do projecto.

A análise do comportamento dinâmico do *kart* foi efectuada, explicitando as solicitações impostas no chassis, nos vários casos possíveis dentro de pista.

Todo o trabalho executado resultou num produto funcional, muito interactivo e personalizável, salientando-se de entre as opções equivalentes disponíveis no mercado, não só pelo custo de utilização e manutenção, mas também pela sua versatilidade em adaptar-se a um vasto leque etário de utilizadores. No entanto, as características do tipo de baterias utilizadas registam já no mercado

novas melhorias, verificando-se um aumento na autonomia praticada, o que poderá despertar o interesse comercial para este tipo de veículo equipado com tecnologia eléctrica.

6.2. Trabalho Futuro

Na sequência do desenvolvimento de um produto com potencial comercial, são indicadas em seguida algumas melhorias que poderão ser implementadas para complementar outras vertentes do objectivo final:

- Desenvolver a componente de segurança ao nível eléctrico e electrónico do veículo.
- Ponderar a substituição do tipo de bateria de LiFePO4, por LiFeYPO4 dispondo de um aumento de autonomia cerca de quatro vezes superior.
- Implementar sensores no veículo para controlar dados como velocidade instantânea, temperatura do controlador, motor e pneus.
- Alterar os indicadores de tensão e corrente analógicos, para equivalentes digitais.
- Fazer uso de transdutores de corrente para aumentar o rigor do valor lido de corrente.
- Explorar afincadamente as potencialidades de configuração electrónica.
- Adaptar o modo de controlo do kart para crianças com deficiências motoras, fazendo uso de potenciómetros e actuadores com accionamento remoto.
- Desenvolver sistema didáctico indicativo da correcta posição em pista, tendo como referência a linha de trajectória ideal.
- Desenvolver um sistema de controlo remoto do kart, permitindo actuar por wireless ou IR na configuração electrónica do veículo quer para auxílio quer para a manutenção de boa prática comportamental dentro da pista.
- Desenvolver análise tecnológica comparativa com opção híbrida.
- Melhorar a protecção contra vibrações impostas aos componentes eléctricos e electrónicos mais sensíveis.
- Desenvolver sistema anti-incêndio. Ponderar botão de actuação rápida para accionar a extinção do incêndio, fazendo uso de condutas com localização programada.
- Explorar afincadamente o controlo electrónico do conjunto.
- Conseguir estabelecer parecerias visando impulsionar as restantes fases do projecto.

7. Bibliografia

[1] “A história do Kart,” [Online]. Available: http://www.viruskart.com/curiosidades/historia.htm. [Acedido em Agosto 2012].

[2] “Infopédia - Enciclopédia e Dicionários Porto Editora: Karting,” [Online]. Available: http://www.infopedia.pt/$karting. [Acedido em Agosto 2012].

[3] “Kartódromo - Cabo do Mundo,” [Online]. Available: http://www.kartodromocabomundo.net/. [Acedido em Agosto 2012].

[4] J. M. N. Botelho e A. M. d. F. Dias, “PROJECTO KidART,” Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2006.

[5] “Kartódromo Internacional de Palmela,” [Online]. Available: http://kip.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=62&Itemid=84&lang=pt. [Acedido em Agosto 2012].

[6] “GP de Évora de Karting - Regulamento,” [Online]. Available: http://kartevora.pt/ficheiros/5%20Gp%20Primavera/REG%20PT.pdf. [Acedido em Agosto 2012].

[7] “IAME - The heart of Kart,” [Online]. Available: http://www.iame.it/en/products/iame-karting-.html?section=motor&id=13&pass=si. [Acedido em Agosto 2012].

[8] “Regulamento Desportivo e Técnico 2012 - CAM Karting - FPAK,” [Online]. Available: http://www.fpak.pt/REG-2012/TROF%20KARTING/REG%20DO%20TROFEU%20CAM%20KART%202012.pdf. [Acedido em Agosto 2012].

[9] “FotoFormulaK - Telemetria no Karting,” [Online]. Available: http://www.fotoformulak.com/index.php?option=com_content&task=view&id=396&Itemid=86. [Acedido em Agosto 2012].

[10] S. E. -. E. R. e. E. Energética, “SAS Energia - Plano Nacional de Acção para Energias Renováveis,” Junho 2010. [Online]. Available: http://sasenergia.pt/blog/media/blogs/PNAER.pdf?mtime=1277320910. [Acedido em Outubro 2012].

[11] “AutoSport - Inovação do Karting em Portugal,” [Online]. Available: http://autosport.sapo.pt/inovacao-do-karting-em-portugalo-kart-electrico=f77103. [Acedido em Setembro 2012].

[12] “Autosil - Baterias,” [Online]. Available: http://www.autosil.pt/abrir/quem_somos. [Acedido em Setembro 2012].

[13] “Autosil - Características do Kart Eléctrico Iwin!,” [Online]. Available: http://www.autosil.pt/public/upload/Novidades/Folheto%20kart%20electrico%20II%20PT.pdf. [Acedido em Setembro 2012].

[14] “Linde Material Handling,” [Online]. Available: http://www.linde-mh.de/de/countrysite/linde_e1_kart/linde_e1_elektro_kart.html#der_rekord. [Acedido em Setembro 2012].

[15] “ERDF Masters Kart,” [Online]. Available: http://www.erdf-masters-kart.com/UK/?page_id=22. [Acedido em Setembro 2012].

[16] “Sodi-Kart,” [Online]. Available: http://www.sodikart.com/en/karts-sodi-prototype.html. [Acedido em Setembro 2012].

[17] “OTL Italia Karts,” [Online]. Available: http://www.kart1.us/electric.html. [Acedido em Setembro 2012].

[18] “CIK-FIA - Comissão Internacional de Karting,” [Online]. Available: http://www.cikfia.com/regulations/homologation.html. [Acedido em Agosto 2012].

[19] “Intrepid Karts - Promotional Video,” [Online]. Available: http://www.youtube.com/watch?v=23nPHvuR0qE. [Acedido em Setembro 2012].

[20] “Recommended Practices for Welding of Chromium-Molybdenum Steel Piping and Tubing,” [Online]. Available: http://pt.scribd.com/doc/53313429/AWS-D0-8-Recomendaciones-tuberias-Cr-Mo. [Acedido em Setembro 2012].

[21] P. V. d. Silva, “Fundamentos do Processo de Soldadura por Fricção Linear,” Tese PhD Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2003.

[22] D. Rodrigues, A. Loureiro e R. Leal, “Soldadura por Fricção Linear,” Universidade de Coimbra, Coimbra, 2008.

[23] B. Emílio, “Desenvolvimento de Aplicações de Soldadura por Fricção Linear a Diferentes Materiais e Espessuras,” Tese de Mestrado, Insituto Superior Técnico, Lisboa, 2008.

[24] “Tesla Motors,” [Online]. Available: http://www.teslamotors.com/models/specs. [Acedido em Agosto 2012].

[25] “Professional Engineering: Electric dreams come true,” [Online]. Available: http://profeng.com/cover-story/electric-dreams-come-true/page:3. [Acedido em Agosto 2012].

[26] “Technology - Mitsubishi i-Miev,” [Online]. Available: http://www.mitsubishi-cars.co.uk/imiev/technology.aspx. [Acedido em Agosto 2012].

[27] K. W. E. C. a. N. C. C. X. D. Xue, “Selection of Electric Motor Drives for Electric Vehicles,” em

Australasian Universities Power Engineering Conference, 2008.

[28] W. E. E. S.A., “Motores de indução alimentados por inversores de frequência,” [Online]. Available: http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-de-inducao-alimentados-por-inversores-de-frequencia-pwm-027-artigo-tecnico-portugues-br.pdf. [Acedido em Agosto 2012].

[29] C. C. Chan, “The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles,” *Proceedings of the IEEE, Vol. 95, No. 4,* Abril 2007.

[30] “WEG - Motores Eléctricos - Guia de Especificação,” Abril 2012. [Online]. Available: http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf. [Acedido em Agosto 2012].

[31] A. F. Burke, “Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles,” *Proceedings of the IEEE, Vol. 95, No. 4,* Abril 2007.

[32] K. Vitols, N. Reinberg, A. Sokolovs e I. Galkin, “Drive Selection for Electric Kart,” em *Power Electronics and Motion Control Conference*, Macedónia, Setembro de 2010.

[33] F.P.Tredeau, “Evaluation of Lithium Iron Phosphate Batteries for Electric Vehicles Application,” *IEEE,* 2009.

[34] W. C. L. 2005, “Electropaedia - Battery and Energy Technologies - State of Charge Determination,” [Online]. Available: http://www.mpoweruk.com/soc.htm. [Acedido em Setembro 2012].

[35] J. L. James Larminie, Electric Vehicle Technology Explained, John Wiley & Sons Ltd, 2003.

[36] A. B. G. F. P. G. e. C. T. Antonio Affanni, “Battery Choice and Management for New-Generation Electric Vehicles,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics, No.5,* vol. 52, Outubro de 2005.

[37] A. Khaligh, “Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology, No.6,* vol. 59, Julho de 2010.

[38] G. May, “Battery Options For Hybrid Electric Vehicles,” em *Hybrid Vehicle Conference*, Coventry, Dezembro de 2006.

[39] L. Streit, “Concept of electric kart with LiFeYPO4 batteries,” em *2011 International Conference on Applied Electronics*, Pilsen, República Checa, Setembro de 2011.

[40] B. Maher, “Maxwell Technologies White Paper - Ultracapacitor and the Hybrid Electric Vehicle,” Maxwell Technologies, Inc. ®, Abril de 2009.

[41] A. B. C. C. G. F. E. L. C. T. A. Affanni, “EV Battery State of Charge: Neural network based estimation,” em *Electric Machines and Drives Conference*, Madison, Wisconsin, Estados Unidos

da América, Junho 2003.

[42] K. Cheng, B. Divakar, H. Wu, K. Ding e H. F. Ho, “Battery-Management System (BMS) and SOC Development for Electrical Vehicles,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 60, No. 1, Janeiro de 2011,* Outubro 2010.

[43] A. R. Tilley e H. D. Associates, The Measure of Man and Woman: Human Factors in Design, Estados Unidos da América: John Wiley & Sons, 2002.

[44] “Lynch Motor Company,” [Online]. Available: http://www.lmcltd.net/index.php?page=motors-and-generators-2. [Acedido em Março 2011].

[45] “Federação Portuguesa de Automobilismo e Karting - Regulamento Técnico Nacional de Karting - 2012,” [Online]. Available: www.fpak.pt. [Acedido em Abril 2012].

[46] F. P. d. A. e. Karting, “FPAK - Recomendações para Karting de Lazer,” 2012. [Online]. Available: http://www.fpak.pt/REG-2012/regulamentos_2012.htm. [Acedido em Setembro 2012].

[47] “Siemens,” [Online]. Available: https://www.automation.siemens.com. [Acedido em Março 2011].

[48] “ABB Portugal,” [Online]. Available: http://www.abb.pt/ProductGuide/. [Acedido em Março 2011].

[49] “Kelly Controls, LLC - Lead to clean the World,” [Online]. Available: www.kellycontroller.com . [Acedido em Março 2011].

[50] “Headway,” [Online]. Available: http://www.chinaheadway.com/. [Acedido em Março 2011].

[51] “Motores Honda - Manual do Proprietário - GX200,” [Online]. Available: http://engines.honda.com/pdf/manuals/37Z4F603.pdf. [Acedido em Agosto 2012].

[52] “Eurocabos - Lisboa, Portugal - Características Técnicas de Condutores Eléctricos,” Junho 2006. [Online]. Available: http://www.eurocabos.pt/links/download.php?id=19. [Acedido em Setembro 2012].

[53] J. W. e. al., “Cycle-life model for graphite- LiFePO4 cells,” *Journal of Power Sources,* 2010.

[54] J. E. Shigley, Mechanical Engineering Design, 8ed in SI units, McGraw - Hill, 2006.

[55] “RIAKART - Kart Dino Leisure - Especificações de Produto,” [Online]. Available: http://www.riakart.pt/product/kart-dino-leisure-outdoor-c-motor-honda-gx-160-1. [Acedido em Setembro 2012].

[56] “International Commercial & Industrial Investment Co. - Honda Gx Series Specifications,” [Online]. Available: http://www.elsayad.com.eg/engine.htm. [Acedido em Setembro 2012].

[57] "Honda Engines," [Online]. Available: http://engines.honda.com/models/model-detail/gx200. [Acedido em Agosto 2012].

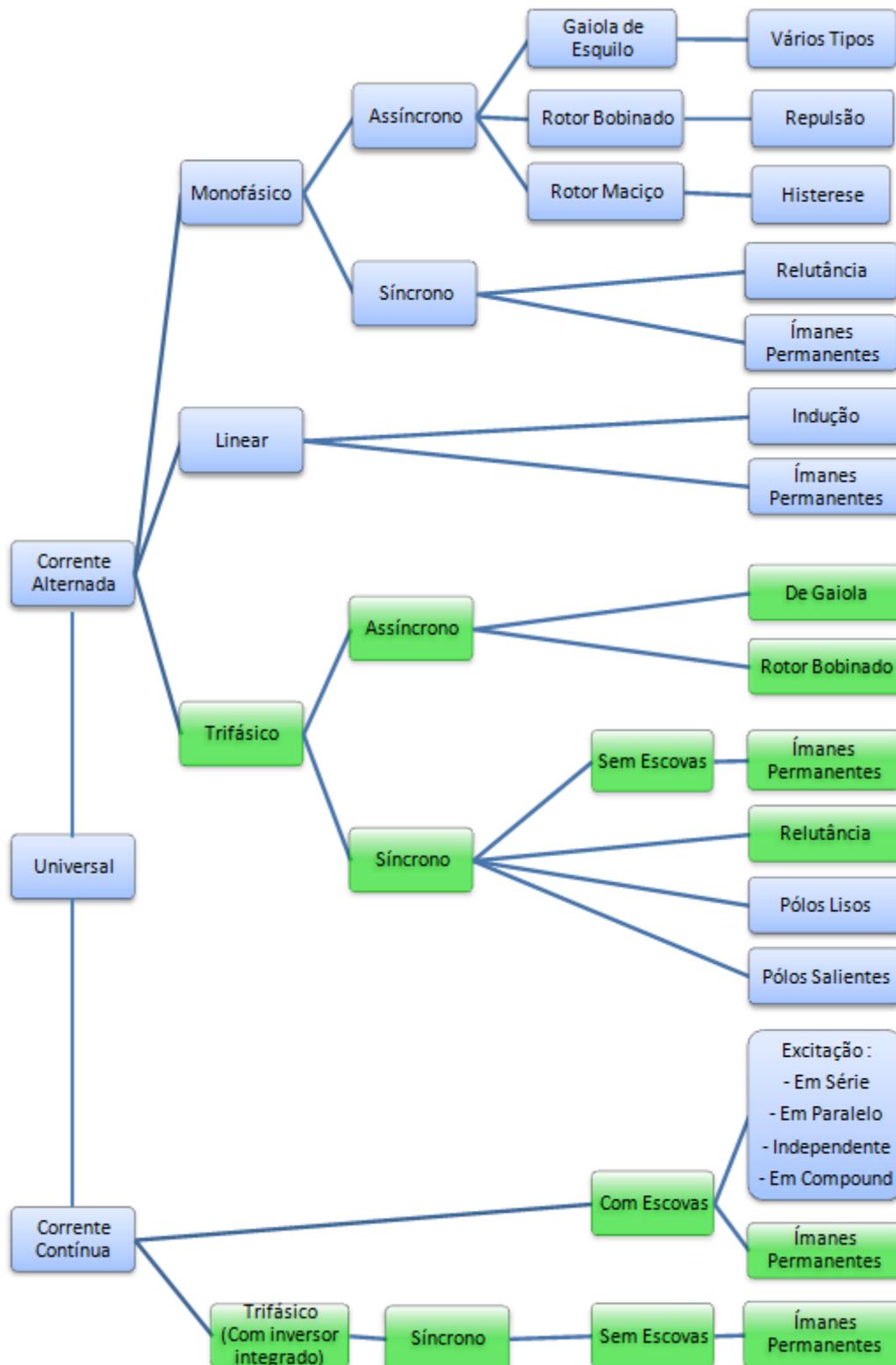
[58] G. B. Rodrigues, "Modelação e Simulação de um Formula Student Eléctrico," Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2009.

[59] M. O. a. E. W. Juan W. Dixon, "Regenerative Braking for an Electric Vehicle Using Ultracapacitors and a Buck-Boost Converter," em *17th Electric Vehicle Symposium*, Montreal, Canada, 2000.

[60] "WEGEURO - INDÚSTRIA ELÉCTRICA, S.A.," [Online]. Available: http://www.weg.net/pt. [Acedido em Agosto 2012].

[61] H. D. &. P. Pillay, "Sizing Ultracapacitors For Hybrid Electric Vehicles," em *Industrial Electronics Society. 31st Annual Conference of IEEE*, Raleigh, Carolina do Norte, Estados Unidos da América, 2005.

Anexos

A1. Universo de Motores Eléctricos Disponíveis

A2. Cálculos Analíticos dos Esforços Envolvidos no Veio Traseiro

Visando aprovar a reutilização de componentes disponíveis no kart de criança, o seguinte caso de estudo é desenvolvido para o projecto de um veio cheio de Ø25mm.

- Considerações

A situação para a qual será efectuada toda a análise de esforços consiste numa redução de velocidade do kart de $90km/h$ para $40km/h$, com uma desaceleração de $1{,}5G\ (14{,}72m/s^2)$, preparando-se para descrever uma curva à esquerda com um raio de $9m$. Na eminência dessa descrição, e fruto do comportamento do chassis em curva, a roda traseira interior à mesma será considerada afastada do solo nesse instante. Foi também assumido que não existe escorregamento entre os pneus e o solo.

Os parâmetros foram assim definidos (* valores estimados):

Grandeza	***Quantidade***	***Unid.***
Massa Chassis*	40	Kg
Massa Condutor*	60	Kg
Massa Componentes*	28	Kg
Velocidade em linha recta*	25	m/s
Velocidade em curva*	11,11	m/s
Raio da Curva*	9	m
Desaceleração*	$-14{,}72\ (-1{,}5G)$	m/s^2
Altura Centro de Massa (h)*	0,25	m
Distância $C.M.$ ao Eixo traseiro (b)*	0,35	m
Comprimento do Eixo	0,95	m
Diâmetro do Pneu	0,274	m

O diagrama de corpo livre do eixo traseiro resulta por fim na seguinte configuração:

- Para o plano xy:

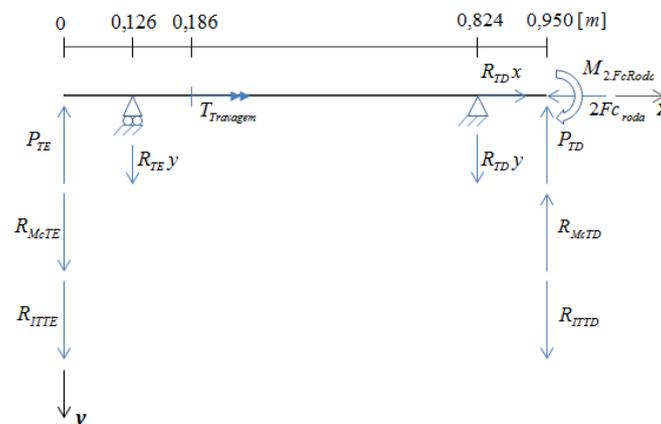



Figura 53 - Diagrama de corpo livre do veio para o plano **xy**

- Para o plano xz

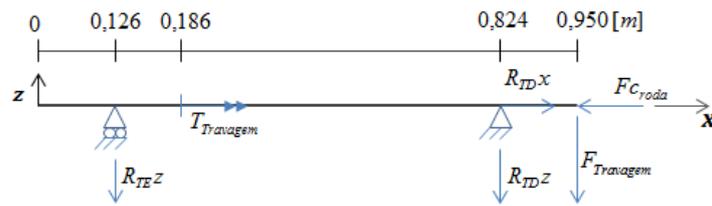
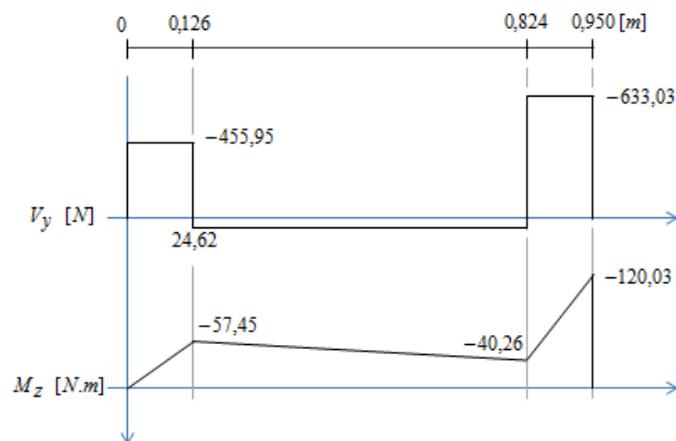



Figura 54 - Diagrama de corpo livre do veio para o plano **xz**

Os diagramas de esforços podem assim ser representados (*cálculos analíticos em A2*):

- Plano xy

- Plano xz

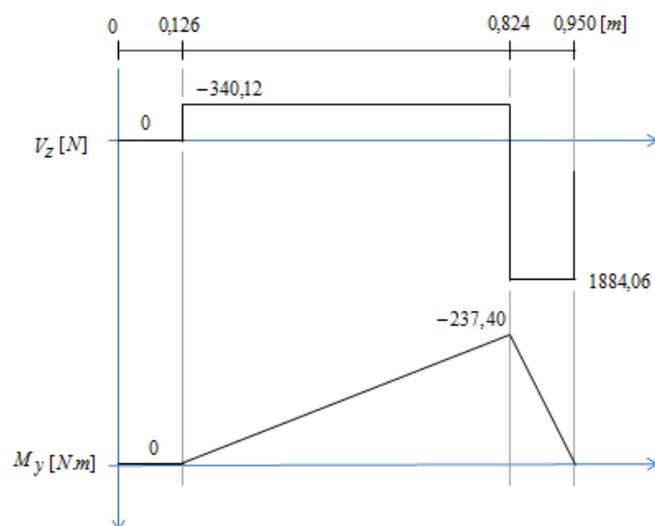



Figura 55 - Diagrama de esforços para os planos **xy** e **xz** respectivamente

Através dos resultados obtidos para os diagramas de esforços é possível prever qual das secções será a mais solicitada. Analisando-os graficamente, a secção correspondente ao rolamento traseiro direito é a que aparenta sofrer maior solicitação. Para confirmar a previsão anterior, foi

necessário determinar um diâmetro baseado no projecto estático do veio. As relações utilizadas foram as seguintes:

1) Tensões devidas ao Momento Flector: $\sigma_M = \frac{32M_f}{\pi d^3}$

2) Tensões devidas ao Esforço Transverso: $\tau_V = \frac{16V}{3\pi d^2}$

3) Tensões devidas ao Momento Torsor: $\tau_T = \frac{16T}{\pi d^3}$

4) Tensão de Von Mises: $\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_M{}^2 + 3(\tau_V{}^2 + \tau_T{}^2)}$

5) Coeficiente de segurança: $n = \frac{S_y}{\sigma_{VM}}$

6) Momento flector e esforço transverso equivalente para uma secção circular:

$M_{f_{eq.}} = \sqrt{M_{f_y}{}^2 + M_{f_z}{}^2}$ $\qquad$ $V_{eq.} = \sqrt{V_y{}^2 + V_z{}^2}$

Para simplificar os cálculos, admitiu-se que o veio em estudo era longo $(l/d \geq 10)$ sendo, dessa forma, desprezáveis os efeitos do esforço transverso.

Depois de manipuladas as expressões (4) e (5) e aplicada a simplificação anterior obteve-se a seguinte relação:

$$\left(\frac{S_y}{n_p}\right)^2 = \left(\frac{32M_{f_{eq.}}}{\pi d^3}\right)^2 + 3\left(\frac{16T}{\pi d^3}\right)^2$$

As tabelas seguintes indicam todos os resultados obtidos e utilizados para o cálculo do valor do diâmetro do veio no projecto estático, com coeficiente de segurança de projecto $n_p = 2$:

Dos diagramas de esforços:

$\boldsymbol{Sec}$ção	**0**	$\boldsymbol{R_{TE}}$	$\boldsymbol{R_{TD}}$	$\boldsymbol{L}$
$\boldsymbol{x(m)}$	0,000	0,126	0,824	0,950
$\boldsymbol{V_y\ (N)}$	-455,95	24,62	-633,03	-633,03
$\boldsymbol{M_z\ (N.m)}$	0	-57,45	-40,27	-120,03
$\boldsymbol{V_z\ (N)}$	0	-340,12	1884,06	1884,06
$\boldsymbol{M_y\ (N.m)}$	0	0	-237,40	0
$\boldsymbol{T_x\ (N.m)}$	0	0	258,13	258,13
$\boldsymbol{V_{eq.}\ (N)}$	455,95	341,01	1987,56	1987,56
$\boldsymbol{M_{eq.}\ (N.m)}$	0	57,45	240,79	120,03

Tabela 11 - Esforços nos rolamentos e nas extremidades do veio

Das relações indicadas anteriormente:

$Secção$	0	R_{TE}	R_{TD}	L
$x(m)$	0,0	0,126	0,824	0,950
$d_{estático}\ (m)$	0,00	0,0130	0,0233	0,0214
$\sigma_M\ (MPa)$	0,00	265,00	194,21	125,35
$\zeta_V\ (MPa)$	0,00	3,41	6,22	7,39
$\zeta_T\ (MPa)$	0,00	0,00	104,10	134,80
$\sigma_{VM}\ (MPa)$	0,00	265,00	265,00	265,00
n_p	---	2,00	2,00	2,00

Tabela 12 - Valores obtidos através das relações

Foi portanto assumido que o diâmetro estático do veio deverá ser no mínimo de $23{,}3mm$. Para esse novo valor de diâmetro foram recalculados os mesmos termos:

$Secção$	0	R_{TE}	R_{TD}	L
$x(m)$	0,0	0,126	0,824	0,950
$d_{estático}\ (m)$	0,0233	0,0233	0,0233	0,0233
$\sigma_M\ (MPa)$	0,0	46,34	194,21	96,80
$\zeta_V\ (MPa)$	1,43	1,07	6,22	6,22
$\zeta_T\ (MPa)$	0,0	0,0	104,10	104,10
$\sigma_{VM}\ (MPa)$	0,0	46,34	265,00	204,64
n_p	----	11,44	2,00	2,59

Tabela 13 - Valores recalculados para o diâmetro mínimo

- ***Fadiga***

Para o projecto à fadiga foi utilizado o critério de Goodman modificado, indicado a seguir:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = \frac{1}{n}$$

Onde:

a) $\sigma_a = \left|\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}\right|$

b) $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$

c) $S_e = k_a . k_b . k_c . k_d . k_e . k_f . S'_e$

i. k_a – Factor de condição de superfície

$$k_a = a \times {S_u}^b \rightarrow \begin{cases} maquinado \\ a = 4{,}51 \\ b = -0{,}265 \\ S_u = 630\ MPa \end{cases}$$

ii. k_b – Factor de escala

$k_b = 1{,}24 \times d^{-0{,}107} \quad 2{,}79\, mm < d \leq 51\, mm$

ou

$\mathrm{k_b} = 1{,}51 \times d^{-0{,}157} \quad 51\, mm < d \leq 254\, mm$

iii. k_c – Factor de carregamento

Carregamento com flexão e torção: $k_c = 1$

iv. k_d – Factor de temperatura

Foi considerada a temperatura ambiente: $k_d = 1$

v. k_e – Factor de fiabilidade

Foi considerada fiabilidade de 50%: $k_e = 1$

vi. k_f – Factor de efeitos diversos

Foi considerado: $k_f = 1$

vii. S'_e – Tensão limite de resistência

$S'_e = 0{,}5 \times S_u \quad para \quad S_u \leq 1460\, MPa$

Nota: Ao longo do veio existem quatro escatéis. Nessas secções as tensões σ_a e σ_m foram corrigidas com um factor de correcção (factor de concentração de tensões - K_f) devido à influência que essas alterações na geometria do veio têm no comportamento do mesmo à fadiga. O factor K_f é afectado pelo factor de sensibilidade ao entalhe[2] (q) que basicamente indica se existem ou não concentrações de tensões na secção em estudo. Assim, fez-se também uso das seguintes expressões:

d) $\sigma^{+} = K_f \times \sigma$

onde: $K_f = 1 + q \times (K_t - 1)$

e) $\sigma_s{}^{+} = K_{fs} \times \sigma_s$

onde: $K_{fs} = 1 + q_s \times (K_{ts} - 1)$

f) $\overline{\sigma_a} = \sqrt{(\sigma_a^{+})^2 + 3(\tau_a^{+})^2} = \sqrt{\left(\frac{32.K_f.M_a}{\pi\,.d^3}\right)^2 + 3\left(\frac{16.K_{fs}.T_a}{\pi.d^3}\right)^2}$

[2] Os gráficos indicativos dos valores de q , K_t e K_{ts} são apresentados em A4.

g) $\overline{\sigma_m} = \sqrt{(\sigma_m^+)^2 + 3(\tau_m^+)^2} = \sqrt{\left(\frac{32.K_f.M_m}{\pi.d^3}\right)^2 + 3\left(\frac{16.K_{fs}.T_m}{\pi.d^3}\right)^2}$

Finalmente, depois de manipuladas as expressões f e g e recorrendo ao critério de Goodman modificado, o diâmetro do veio à fadiga pode ser obtido através de:

$$d = \left(\frac{16n}{\pi}\left\{\frac{1}{S_e}\left[4\left(K_f.M_a\right)^2 + 3\left(K_{fs}.T_a\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_u}\left[4\left(K_f.M_m\right)^2 + 3\left(K_{fs}.T_m\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}\right\}\right)^{\frac{1}{3}}$$

Obs.: Na expressão *h),* é utilizado o valor da tensão limite de fadiga (S_e). No entanto, para o cálculo desse valor é necessário introduzir o valor do diâmetro do veio (aquando do cálculo do factor k_b). Assim, foi utilizado um processo iterativo para fazer convergir os valores desses diâmetros.

Para uma primeira aproximação do diâmetro do veio no projecto à fadiga, é usualmente utilizada a seguinte relação:

$$d_{fadiga} = 1,6 \times d_{estático}$$

Com o valor do diâmetro estático já determinado na secção anterior o resultado da aproximação do diâmetro do veio à fadiga é:

$$d_{fadiga} = 1,6 \times 0.0233 = 0,0372\, m$$

Depois de efectuado o processo iterativo, o diâmetro final obtido foi de $37,02mm$ (este é o diâmetro da zona do escatel existente em $x = 0,864m$, agora secção crítica do veio, aspecto abordado mais à frente), pelo que a aproximação anterior se revelou ser um bom ponto de partida.

Todos os valores utilizados[3] e resultados finais obtidos das iterações estão concentrados nas tabelas que se seguem:

	$0\,m$	$0,126m$	$0,824m$	$0,950m$
σ_{Min} (MPa)	0,00	-11,54	-48,37	-24,11
σ_{Max} (MPa)	0,00	11,54	48,37	24,11
ζT_{Min} (MPa)	0,00	0,00	25,92	25,92
ζT_{Max} (MPa)	0,00	0,00	25,92	25,92
σ_{Med} (MPa)	0,00	0,00	0,00	0,00
σ_A (MPa)	0,00	11,54	48,37	24,11
ζ_M (MPa)	0,00	0,00	25,92	25,92
ζ_A (MPa)	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 14 - Valores obtidos através das relações

[3] No anexo A5 é apresentada uma breve explicação sobre tensões normais e de corte, médias e alternadas.

	$P/\ L_{Total}\ do\ veio$
Diâmetro fad (mm)	37,02
k_a	0,817
k_b	0,843
k_c	1
k_d	1
k_e	1
k_f	1
$S'_e\ (MPa)$	315,00
$S_e\ (Mpa)$	216,90

Tabela 15 - Valores utilizados para o cálculo da tensão limite de fadiga

Ao longo do veio existem quatro escatéis: dois referentes aos cubos das rodas (próximos das extremidades do veio), e os restantes referentes à zona de fixação do disco de travão (em $x = 0{,}186m$), e à zona de fixação da polia, elemento encarregue de transmitir ao veio a rotação imposta pelo motor (em $x = 0{,}864m$). Dado este facto, a secção crítica poderia deixar de coincidir com a determinada no projecto estático (relembre-se: secção onde se encontra o rolamento traseiro direito). Foram assim desenvolvidos os cálculos para determinar qual a secção crítica associada ao projecto à fadiga, com base nos quais se determinou que, a nova secção crítica se localizava na zona do escatel da polia.

	Secção $s/escatel$	Secção $c/escatel$
$x(m)$	0,824	0,864
q	0,0	0,75
q_s	0,0	0,85
K_t	1,0	2,2
K_{ts}	1,0	3,0
K_f	1,0	1,9
K_{fs}	1,0	2,7
$\sigma_M^+\ (MPa)$	0,00	0,00
$\sigma_A^+\ (MPa)$	48,37	66,71
$\zeta_M^+\ (MPa)$	25,92	69,99
$\zeta_A^+\ (MPa)$	0,00	0,00
$\overline{\sigma}_{VM}{}^+{}_a(Mpa)$	48,37	66,71
$\overline{\sigma}_{VM}{}^+{}_m\ (Mpa)$	44,90	121,23
$M_a\ (N.m)$	240,79	174,81
$M_m\ (N.m)$	0,00	0,00
$T_a\ (N.m)$	0,00	0,00
$T_m\ (N.m)$	258,13	258,13
$d_{Goodman}\ (m)$	0,0310	0,0370
$n_{fad.}$	3,40	2,00
$n_{est.}$	8,03	9,30

Tabela 16 - Valores obtidos para o cálculo do diâmetro do veio à fadiga

Notas de Projecto

Toda a análise desenvolvida até aqui foi baseada em parâmetros estimados. Devido a esse facto, foi desde início acautelado o sobredimensionamento das solicitações em causa, por exemplo, associando esforços envolvidos durante uma travagem, à exigência dinâmica da descrição de uma curva.

Note-se porém que, numa aplicação real, e se se verificasse a aplicação no protóripo em causa, não são previstas solicitações de tão elevada exigência uma vez que a sua utilização deverá incidir sobre um carácter demonstrativo e não competitivo.

Desta forma, será utilizado um diâmetro final de $25mm$, idêntico aos veios comumente utilizados em chassis de tamanho de criança, incluindo quatro escatéis nas zonas dos cubos das rodas (próximo das extremidades do veio), e os restantes na zona de fixação do disco de travão, e na zona de fixação da polia.

Nesta situação, mantendo o momento de travagem (e portanto $F_{Travagem}$, V_z e M_y igualmente fixos), M_z na secção $x = 0{,}824m$ poderá no limite atingir $240N.m$ (valor calculado em projecto estático para um diâmetro do veio de $25mm$).

O dimensionamento das chavetas a utilizar está desenvolvido no anexo A6. No projecto destas foi utilizado um material com menor tensão de cedência comparativamente à tensão de cedência do veio para que estas funcionem como fusível numa situação imprevista. [54]

Para determinar os esforços envolvidos foram consideradas simplificações, oportunamente indicadas:

Peso total do conjunto:

$$P_{Total} = \sum m_i \times 9{,}81 = (40 + 60 + 28) \times 9{,}81 = 1255{,}68N$$

- Foi considerado que a fracção do peso do conjunto, inicialmente presente na roda traseira esquerda, é totalmente transferida para a roda traseira direita durante a execução da curva à esquerda:

$$\begin{cases} P_{TE} = 0 \\ P_{TD} = 2 \times \dfrac{P_{Total}}{4} = 627{,}84N \end{cases}$$

Força Centrípeta:

- $F_c = m.\frac{v^2}{r} \leftrightarrow F_c = 128.\,11{,}1^2/9 = 1752{,}32\ N$

Reacção da força centrípeta por roda:

- $F_{c_{roda}} = 1752{,}32/4 = 438{,}08\ N$

- Foi considerado que a fracção da reacção da força centrípeta do conjunto, inicialmente presente na roda traseira esquerda, é totalmente transferida para a roda traseira direita durante a execução da curva e portanto:

- $2.F_{c_{roda}} = 2 \times 438{,}08 = 876{,}16N$

O momento resultante da acção dessa resultante é dado por:

- $M_{2.Fc\ Roda} = 2.F_{c_{roda}} \times Raio_{Pneu} = 876{,}16 \times 0{,}137 = 120{,}03N.m$

O momento resultante da acção da força centrípeta no $C.M.$ do kart é dado por:

- $M_C = F_{Centrípeta} \times h = 1752{,}32 \times 0{,}25 = 438{,}08N.m$

As reacções verticais daí resultantes que surgem nas extremidades do veio são:

- A reacção dos lados esquerdo e direito do kart:

- $R_{McE} = -R_{McD} = M_C/L_T = 438{,}08/0{,}950 = 461{,}14N$

Para o lado esquerdo, considerando que as reacções laterais são igualmente distribuídas pelas rodas dianteira e traseira, tem-se:

- $R_{McE} = R_{McFE} + R_{McTE}\ \wedge R_{McFE} = R_{McTE}$

Para o lado direito tem-se:

- $R_{McD} = R_{McFD} + R_{McTD}\ \wedge R_{McFD} = R_{McTD}$

De onde resulta:

- $R_{McTE} = R_{McE}/2 = 230{,}57N$
- $R_{McTD} = -230{,}57N$

Força travagem necessária:

- $F_{Travagem} = m \times a = 128 \times 14{,}72 = 1884{,}16\ N$

O binário de travagem necessário é de:

- $T_{Travagem} = F_{Travagem} \times Raio_{Pneu} = 1884{,}16 \times 0{,}137 = 258{,}13N.m$

Momento de inércia de travagem:

- $M_{IT} = F_{Travagem} \times h = 1884{,}16 \times 0{,}25 = 471{,}04\ N.m$

Do equilíbrio de forças e momentos em $\boldsymbol{O}$ segundo o eixo transversal do kart que passa nesse ponto, referente apenas à acção da força de inércia de travagem aplicada no centro de massa do kart tem-se:

- $M_{IT} = R_{ITF} \times a + R_{ITT} \times b$
- $+\downarrow \sum F_y = 0 \leftrightarrow R_{ITF} - R_{ITT} = 0 \leftrightarrow R_{ITF} = R_{ITT}$

Logo:

- $R_{ITF} = M_{IT}/(a + b) = 471{,}04/1{,}045 = 450{,}76N$
- $R_{ITT} = -450{,}76N$

Uma vez que:

- $R_{ITT} = R_{ITTE} + R_{ITTD} \wedge R_{ITTE} = R_{ITTD}$

Tem-se:

- $R_{ITTE} = R_{ITT}/2 = 225{,}38\text{N}$

A3. Cálculo dos Diagramas de Esforços

Para a formulação a estabelecer em seguida, adoptou-se a seguinte convenção:

- O esforço normal de tracção $\boldsymbol{N}$ é positivo, sendo negativo o de compressão
- Os esforços de corte $\boldsymbol{V_y}$ e $\boldsymbol{V_z}$ são positivos quando actuam na face positiva da secção transversal, segundo o sentido de y e z crescentes respectivamente.
- O binário de torção $\boldsymbol{T_x}$ é positivo quando provoca a rotação no sentido contrário aos ponteiros do relógio (de y para z) para a face positiva da secção transversal.
- O momento flector $\boldsymbol{M_y}$ é positivo quando provoca tracção nas fibras do lado positivo do eixo Z
- O momento flector $\boldsymbol{M_z}$ é positivo quando provoca tracção nas fibras do lado positivo do eixo Y.

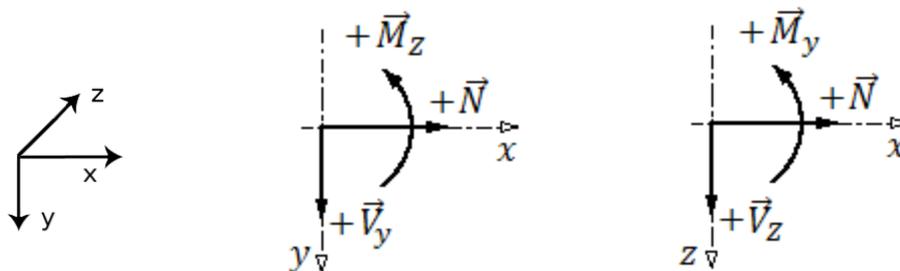



Figura A2. 1 – Convenção de sinais adoptada

Do equilíbrio de forças e momentos para o plano xy tem-se:

$$(1) \sum F_x = 0 \leftrightarrow R_{TDx} - 2F_{C\,Roda} = 0 \leftrightarrow R_{TDx} = 2F_{C\,Roda} = 876{,}16N$$

$$(2) \sum F_y = 0 \leftrightarrow$$
$$\leftrightarrow -P_{TE} + R_{McTE} + R_{ITTE} + R_{TEy} + R_{TDy} - P_{TD} - R_{McTD} + R_{ITTD} = 0 \leftrightarrow$$
$$\leftrightarrow R_{TEy} + R_{TDy} = P_{TD} - R_{ITTE} - R_{ITTD}$$
$$com\ P_{TE} = 0$$

$$(3) \sum M_{Z_{|x=RTE}} = 0 \leftrightarrow$$
$$\leftrightarrow (R_{McTE} + R_{ITTE}).0{,}126 - R_{TDy}.0{,}698 + (P_{TD} + R_{McTD} - R_{ITTD}).0{,}824 - M_{2FcRoda} = 0 \leftrightarrow$$
$$\leftrightarrow R_{TDy} = (1/0{,}698) \times (455{,}95 \times 0{,}126 + 633{,}03 \times 0{,}824 - 120{,}03) \leftrightarrow$$
$$\leftrightarrow R_{TDy} = 657{,}65N \downarrow$$

De (2) e de (3): $R_{TE_Y} = 480{,}57N\ \uparrow$

Do equilíbrio de forças e momentos para o plano xz tem-se:

$$(4) \sum F_Z = 0 \leftrightarrow -R_{TEz} - R_{TDz} - F_{Travagem} = 0 \leftrightarrow R_{TEz} + R_{TDz} = -F_{Travagem}$$

$$(5) \sum M_{Y_{|x=RTE}} = 0 \leftrightarrow 0{,}698. R_{TD_Z} + 0{,}824. F_{Travagem} = 0 \leftrightarrow$$
$$\leftrightarrow R_{TD_Z} = -(0{,}824 \times 1884{,}16)/0{,}698 = 2224{,}28N \downarrow$$

De (4) e de (5): $R_{TE_Z} = -340{,}12 = 340{,}12N \uparrow$

Plano xy

Para: $0 \leq x < 0{,}126\, m$

$$(7) \sum F_Y = 0 \leftrightarrow -P_{TE} + R_{McTE} + R_{ITTE} + V_y = 0 \leftrightarrow V_y = -455{,}95N$$

$$(8) \sum M_Z = 0 \leftrightarrow 455{,}95. x + M_Z = 0 \leftrightarrow M_Z = -455{,}95. x\, N.m$$

Para: $0{,}126 \leq x < 0{,}824m$

$$(9) \sum F_Y = 0 \leftrightarrow 455{,}95 - 480{,}57 + V_y = 0 \leftrightarrow$$
$$\leftrightarrow V_y = 24{,}62N$$

$$(10) \sum M_Z = 0 \leftrightarrow 455{,}95(0{,}126 + x) - 480{,}57. x + M_Z = 0 \leftrightarrow$$
$$\leftrightarrow M_Z = 24{,}62x - 57{,}45\, N.m$$

Para: $0{,}824 \leq x < 0{,}950\, m$

$$(9) \sum F_Y = 0 \leftrightarrow 455{,}95 - 480{,}57 + 657{,}65 + V_y = 0 \leftrightarrow$$
$$\leftrightarrow V_y = -633{,}03N$$

$$(10) \sum M_Z = 0 \leftrightarrow$$
$$\leftrightarrow 455{,}95(0{,}824 + x) - 480{,}57. (0{,}698 + x) + 657{,}65x + M_Z = 0 \leftrightarrow$$
$$\leftrightarrow M_Z = -633{,}03x - 40{,}26\, N.m$$

Plano xz

Para: $0 \leq x < 0{,}126m$

(12) $\sum F_z = 0 \leftrightarrow V_Z = 0$

(13) $\sum M_Y = 0 \leftrightarrow M_Y = 0$

Para: $0{,}126 \leq x < 0{,}824\ m$

(14) $\sum F_z = 0 \leftrightarrow -R_{TE}z + V_Z = 0 \leftrightarrow V_Z = -340{,}12N$

(15) $\sum M_Y = 0 \leftrightarrow -R_{TE}z.x + M_Y = 0 \leftrightarrow M_Y = R_{TE}z.x = -340{,}12x\ N.m$

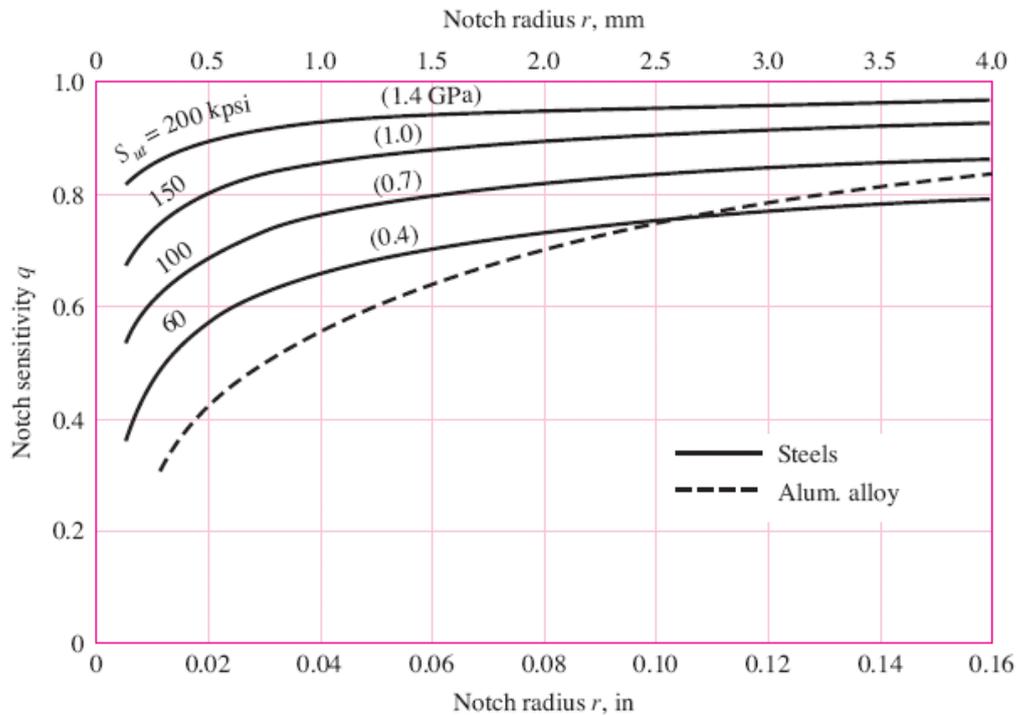
Para: $0{,}824 \leq x < 0{,}950\ m$

(14) $\sum F_z = 0 \leftrightarrow -R_{TE}z - R_{TD}z + V_Z = 0 \leftrightarrow V_Z = -340{,}12 + 2224{,}18 = 1884{,}06N$

(16) $\sum M_Y = 0 \leftrightarrow -R_{TE}z.(0{,}698 + x) - R_{TD}z.x + M_Y = 0 \leftrightarrow$
$\leftrightarrow M_y = -340{,}12x + 2224{,}18x - 237{,}40 = 1884{,}06x - 237{,}40\ N.m$

A4. Gráficos Utilizados para a Recolha dos Factores de Sensibilidade ao Entalhe para Flexão e Torção:

Gráficos utilizados para a recolha dos factores de sensibilidade ao entalhe para flexão e torção respectivamente (Fig. 6.20 e 6.21 de *[54]*) :

- $q = 0{,}75$, com $r = 1mm$ e $S_u = 630MPa$

- $q_s = 0{,}85$, com $r = 1mm$ e Dureza Brinell < 200HB

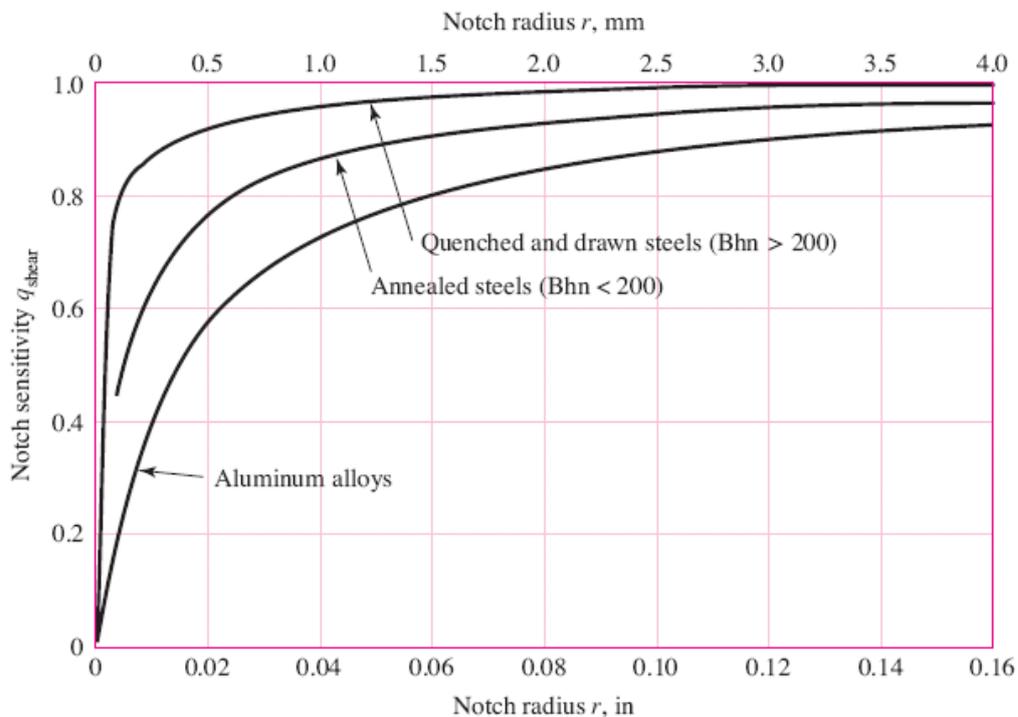



Tabela 7-1 de *[54]*

Para o escatel:

- $K_t = 2.2$ e $K_{ts} = 3.0$

	Bending	Torsional	Axial
Shoulder fillet—sharp (r/d = 0.02)	2.7	2.2	3.0
Shoulder fillet—well rounded (r/d = 0.1)	1.7	1.5	1.9
End-mill keyseat (r/d = 0.02)	2.2	3.0	—
Sled runner keyseat	1.7	—	—
Retaining ring groove	5.0	3.0	5.0

A5. Notas Sobre Tensões Normais e de Corte, Médias e Alternadas

Dado que o veio se encontra em rotação, as tensões numa mesma fibra não são constantes. Como o carregamento respectivo ao momento flector permanece inalterado em relação ao sistema de eixos, as tensões normais máxima e mínima são simétricas ($R = \sigma_{min}/\sigma_{máx} = -1$) e surgem na mesma fibra a cada meia rotação. Deste facto resultam tensões normais médias iguais a zero, e tensões normais alternadas diferentes de zero.

Para o caso da torção, como o carregamento se mantém constante em cada secção do veio, as tensões de corte médias vão igualar-se às tensões de corte máximas, e por outro lado as tensões de corte alternadas serão iguais a zero.

As expressões a seguir podem confirmar o que foi dito acima:

- $M_{eq_a} = \left|\frac{M_{eq_{max}} - M_{eq_{min}}}{2}\right|$

- $M_{eq_m} = \frac{M_{eq_{max}} + M_{eq_{min}}}{2}$

- $T_a = \left|\frac{T_{max} - T_{min}}{2}\right|$

- $T_m = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$

A6. Dimensionamento da Chaveta

As dimensões da chaveta a utilizar são apresentadas na tabela que se segue e foram recolhidas da tabela 7.6 de [1].

	Dimensões da chaveta	
l	Comprimento (mm)	50,0
h	Altura (mm)	5,0
b	Largura (mm)	6,0
	Profundidade no veio (mm)	2,0

O material tem menor tensão de cedência que o material do material do veio para que a chaveta funcione como fusível. O material escolhido é apresentado na tabela seguinte:

Material AISI 1040 CD	
S_y	$490\ MPa$
S_u	$590\ MPa$
$S_{sy} = 0{,}577 S_y$ (Von mises)	$283\ MPa$

Cálculo da força tangencial aplicada na chaveta:

Força Tangencial		
Binário de torção	258,3	$N.m$
Diâmetro da Secção	0,025	m
Força Tangencial $F_t = Bin./(\emptyset/2)$	20664,0	N

- Dimensionamento ao corte:

Área de corte (A_c)	0,00040110	m^2	$(l-b).b + \left(\pi.\frac{b^2}{4}\right)$
Tensão de corte	70,71	MPa	$\tau = F_t/A_c$
Factor de segurança ao corte n_c	3,99		$n_c = S_{Sy}/\tau$

- Dimensionamento ao esmagamento:

Área de esmagamento (A_e)	0,00009	m^2	$(l-b).p$
Tensão normal	234,82	MPa	$\sigma = F/A_e$
Factor de segurança ao esmagamento n_e	2,1		$ne = S_y/\sigma$

Com base nos factores de segurança obtidos, está verificada a segurança da chaveta ao corte e ao esmagamento.